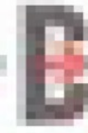
Bilim ve Gelecek Kitaplığı



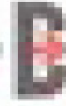


Görelilik kuramları

İbrahim Semiz



Bilim ve Gelecek Kitaplığı





Görelilik kuramları

İbrahim Semiz



3

İbrahim Semiz

Birinci Baskı: Bilim ve Gelecek Kitaplığı, Haziran 2010
Gözden Geçirilmiş İkinci Baskı: Bilim ve Gelecek Kitaplığı, Nisan 2011
ISBN: 978-605-5888-11-4
Yayın danışmanı: Prof. Dr. Ömür Akyüz
Yayıma hazırlayan: Nalân Mahsereci
Kapak tasarımı: Deniz Akkol
Sayfa tasarımı: Baha Okar
Baskı: Kayhan Matbaacılık
Davutpaşa C. Güven Sanayi Sitesi B Blok No: 244
Topkapı - İstanbul
Tel: 0212.612 31 85
7 Renk Basım Yayın ve Filmcilik Ltd. Şti
Moda C. Zuhal Sk. No: 9/1, Kadıköy-Istanbul
Tel: 0216.349 71 72
http://www.bilimvegelecek.com.tr
e-mail: bilgi@bilimvegelecek.com.tr

görelilik kuramları

İBRAHİM SEMİZ



Kitap Dizisi -3

Sunuş

50 Soruda Görelilik Kuramları, Bilim ve Gelecek Kitaplığı'nın "50 Soruda" dizisinin üçüncü kitabı. **İbrahim Semiz**, bu kitapta, fizikte devrim sayılan ve günümüz fiziğini anlamak için olmazsa olmaz olan özel ve genel görelilik kuramlarını, altyapısını oluşturan ve ilintili olduğu tüm konularla birlikte anlatıyor. Yazarın, diyalog formatını kullanarak, soru sayısını 50'den birkaç misline çıkardığını fark edeceksiniz. Söyleşi formatının soru sayısını artırmanın yanında, konuyu daha yalın, keyifli ve ilginin sürekliliğini sağlayacak biçimde anlatmada ve öğrenme coşkusuna okuru ortak etmede, yazarının elinde büyük bir avantaja dönüştüğünü söyleyebiliriz. Yazarın, evrene bakışımızı değiştiren, getirdiği devrimsel yeniliklerle olduğu kadar sezdirdiği ufuklarla da heyecan verici olan görelilik kuramlarını, olabildiğince anlaşılır anlatmak ve "sürükleyici" hale getirmek için, her türlü araçtan, örneğin evrenbilimden bilimkurguya uzanan sıra dışı temalardan yararlandığını da göreceksiniz. Keyifle okuyacağınızı düşünüyoruz.

***

"50 Soruda" dizisi kitaplarının "Sunuş"larında, kitabın yanı sıra dizi hakkında da bilgi vermeyi amaçlıyoruz. Bu satırlarda ve aşağıda, dizinin diğer kitaplarını edinmiş okurlar için tekrar olacak, ama dizinin bir kitabıyla yeni karşılaşmış okurlar düşünülerek yinelenen bilgiler yer alıyor. Yazının kalanına bu ikinci tanımdaki okurla devam edebiliriz.

50 Soruda dizisi, bilimin ve felsefenin temel kuramlarını ve alanlarını, soru ve yanıtlarla ele alan, Türkiyeli bilim insanlarının kaleme aldığı popüler bilim kitaplarından oluşuyor. Bu kitaplar bilimin, anlaşılmaz, karmaşık, hayattan kopuk, soğuk, kuru ve teknolojiye indirgenmiş bir bilgi yığını olmadığını, tam tersine, evreni, doğayı, toplumu ve insanı anlamak için anahtarlar sunan, bilme, öğrenme coşkusu uyandıran, en güvenilir bilgi kaynağı olduğunu gösterebilmeyi hedefliyor.

Kitapçı raflarının, kıyamet senaryoları, gizli kapaklı mistik örgütlenmeler, astroloji ve diğer fallar, büyüler, mucizeler, ilahi enerjiler gibi, dinsel ve metafizik kaynaklı her türden dogma ve safsatayı içeren kitaplarla dolup taştığını, bu alanlarda çok yoğun bir yayın etkinliği olduğunu görüyoruz. Bu yayınlar özellikle gençleri etkilemekte, kafalarını bulandırmakta. Ne yazık ki, eğitim sistemimiz, gençleri dogma ve safsataların kafa bulandırıcılığından koruyacak çağdaş bilimsel bir içerikte değil. Üstelik her geçen gün bu içerikten daha da fazla uzaklaştığına endişeyle tanıklık etmekteyiz. Oysa bu ülke, bu halk, “Hayatta en gerçek yol gösterici bilimdir, fendir” diye yola çıkmıştı…

Bilim ve Gelecek dergisini ve kitaplarını çıkaran kolektif olarak, yeni ve daha köklü bir aydınlanma atılımının gerçekleşmesi, bilimsel düşüncenin toplumun hücrelerine yayılması, insanlarımıza bilimsel refleks kazandırılması hedefini sürerken, gençlere ulaşmanın öneminin bilincindeyiz. 50 Soruda dizisini, bu bilinçle, bilimin genç okurlarına yönelik olarak yayımlamaya başladık. “Bilimin genç okurlarından” kastımız sadece yaşça genç olanlar değil; az ya da aşağı yukarı bildiklerini temel düzeye oturtmayı ve genel kültüre çevirmeyi hedefleyen büyük küçük herkes…

Dizinin kitapları, alanlarının uzmanı olmanın yanı sıra, konularını popüler düzeyde ve kendi anadillerinde anlatma konusunda da donanımlı, “yerli” bilim insanları tarafından hazırlanıyor. Bilimsel açıdan yanlışsız ama, anlaşılırlık açısından tavizsiz olmaya çalışıyorlar. Temel düzeyde ve bir nevi genişçe bir ansiklopedi maddesi gibi bilgi veriyorlar. Ancak bilimin ortaya koyduklarını göstermekle yetinmiyor, vaat ettiği düşünsel ufukları da sezdiriyorlar. “50 Soruda” dizisinde yer alan kitapların konularını, ülkemizin

bilimsel-kültürel ihtiyaçları çerçevesinde düşünmeye çalışıyoruz. Bu anlamda konularımız da “yerli.”

Dizi kapsamında şimdiye dek elinizdekiyle birlikte yedi kitap yayımladık. İlk kitap, Prof. Dr. **Metin Özbek**’in insanın evrimini, canlılar dünyasında ait olduğu primatlar takımından başlayarak, hem biyolojik, hem kültürel adımların izini sürerek anlattığı, 50 *Soruda İnsanın Tarihöncesi Evrimi* idi. *50 Soruda Aydınlanma*’da, **Afşar** ve **Ali Timuçin**, insan aklının zincirlerinden kurtulmasında çok önemli bir adım olan, 18. yüzyıl Aydınlanma devrimini, gelişim süreci içinde, toplumsal ve siyasal koşullarla bağı, düşünsel kaynakları ve yarattığı etkiler, önemli düşünürlerinin görüşleri gibi temel boyutlarıyla ele aldılar. *50 Soruda Deprem*’de Prof. Dr. **Haluk Eyidoğan**, bu toprakların değişmez gerçeği deprem olgusunu bilimsel olarak kavramamıza ve deprem kayıplarını en aza indirebilmemize hizmet eden bir bilgi çerçevesi oluşturdu. *50 Soruda Büyük Patlama Kuramı*’nda, Prof. Dr. **Metin Hotinli**, evrenin nasıl oluştuğunu ve geleceğini açıklayan büyük patlama kuramını, dinamik ve evrim halinde bir evren gerçeğine ulaşmanın tarihi çerçevesinde ele aldı. *50 Soruda Yer’in Evrimi*’nde ise, Prof. Dr. **Mehmet Sakınç**, Yer’in milyarlarca yılda geçirdiği tüm değişimleri, üzerinde yaşayan canlıların evrimiyle kopmaz bağını da içerecek bir biçimde ele aldı. *50 Soruda Yaşamın Tarihi*’nde **Dr. Deniz Şahin**, yaşamın nasıl oluştuğunu, ne kadar farklı şekillere girebildiğini, aklımıza bile gelmeyecek yerlerde bile nasıl gelişebildiğini ve çeşitlenerek yeni türleri nasıl ortaya çıkarabildiğini gösteren dirençli tarihini geniş bir bilimsel bağlamda anlattı.

“50 Soruda” dizisine, 2010 başında 13 kitaplık bir paket oluşturarak başlamıştık. Bu ilk paketten geriye kalan altı kitap daha var, aşağı yukarı yayın sıraları şöyle:

- 50 Soruda Arkeoloji / **Prof. Dr. Mehmet Özdoğan**
- 50 Soruda Matematik /**Prof. Dr. Şahin Koçak**
- 50 Soruda Evren / **Çağlar Sunay**
- 50 Soruda Bilim ve Bilimsel Yöntem / Ed.**Alaeddin Şenel**
- 50 Soruda Darwin ve Evrim Kuramı / **Prof. Dr. Haluk Ertan**

- 50 Soruda Kuantum Kuramı ve Nanoteknoloji / **Prof. Dr. Tekin Dereli - Prof. Dr. Gülay Dereli**

2011 başında, 50 Soruda dizisinin 10 kitaplık ikinci paketini oluşturduk. Şu kitaplar yer alıyor:

- 50 Soruda Moleküler Evrim / **Doç. Dr. Ergi Deniz Özsoy**
- 50 Soruda Jeoloji / **Prof. Dr. A. M. Celal Şengör**
- 50 Soruda Beyin ve Bilinç / **Dr. Saffet Murat Tura**
- 50 Soruda Hz. Muhammed ve Kuran / **Yard. Doç. Dr. Hasan Aydın**
- 50 Soruda Sosyal ve Kültürel Antropoloji / **Doç. Dr. Sibel Özbudun - Dr. Gülfem Uysal**
- 50 Soruda Maddenin Evrimi / **Doç. Dr. Kerem Cankoçak**
- 50 Soruda Psikiyatri / **Prof. Dr. Ali Nahit Babaoğlu**
- 50 Soruda Enerji Kaynaklarımız / **Prof. Dr. Osman Demircan**
- 50 Soruda Genler ve Genetik / **Dr. Kenan Ateş**
- 50 Soruda Avrupa-merkezcilik / **Ender Helvacıoğlu**
- 50 Filmde Türkiye Sinema Tarihi / **Zahit Atam**

"50 Soruda" dizisinin 23 kitaplık listesinin tamamına ve bu kitapları edinebilmekle ilgili özel kampanya duyurularına, elinizdeki kitabın arka sayfalarından ulaşabilirsiniz. Önümüzdeki yıllarda, "50 Soruda" dizisini yeni bilimsel ve felsefi konularla sürdüreceğiz.

Türkçe'de popüler bilim yayıncılığının temel eserleri haline gelmesini umduğumuz "50 Soruda" dizisi kitaplarının, birer başvuru kaynağı olarak bilimle ilgili herkesin kütüphanesine girmesi gerektiğini düşünüyoruz. Sadece kişisel kütüphanelerin değil, kurum kütüphaneleri ve özellikle de eğitim kurumlarının kütüphanelerinin de temel başvuru kaynağı varlıkları arasına girebilecek niteliktedirler; gerekirse yardımcı ders kitabı olarak da yararlanılabilirler.

Sözün özü, "50 Soruda" dizisini, bilimsel düşüncenin topluma yayılmasının bir aracı, bir aydınlanma hizmeti olarak tasarladık. Okurlarımızı, "50 Soruda" dizisini okumaya ve okutmaya çağırıyoruz. Gelin Türkiye aydınlanmasına hep birlikte bir katkı yapalım…

Nalân Mahsereci

Önsöz

Özel ve genel görelilik (izafiyet, rölativite) kuramları (1905 ve 1915) günümüz fiziğinin 2. ve 3. bilimsel devrimleridir. (1.'si Max Ludwig Karl Planck tarafından 1900 yılında başlatılan kuantum fiziğidir.) Görelilik kuramlarıyla Newton'da kesinleşen **mutlak uzay** ve **mutlak zaman** kavramları ortadan kaldırılıp yerine **bütünleşmiş uzay-zaman** kavramı getirildiği gibi **kütleçekimi** (cazibe-i arz, gravitasyon ya da metinde kullanılan genelçekim) **olgusu da geometriye indirgendi.** Geçerlilikleri çeşitli gözlem ve deneylerle gösterilmiş olan her iki kuramın da **Albert Einstein**'ın marifeti olduğunu herkes bilir.

İzleyen sayfalarda eski öğrencim ve yıllardır değerli meslektaşım olan İbrahim Semiz, bu olguların, 50 soru başlığında toplanmış çok sayıda soru-yanıtla **eğlenceli** ama kimileri kolay olmayan açıklamalarını, fiziğin birçok temel ilkesiyle birlikte sunmakta. Kendisi bu konuların uzmanıdır; bunları yıllardır verdiği derslerde, hep sıra dışı örnek ve açıklamalarla işlemekte olup, hatta sınav sorularını bile böylesine hazırladığından, okuyucuyla çok rahat iletişim kuracağı kanısındayım.

Bu arada bir **0. soruyla** okuyucuya Einstein'ı da biraz tanıtmak istedim.

R. Ömür Akyüz
Fizik Profesörü,
Yeditepe ve Boğaziçi Üniv.

0-Einstein kimdir?

Einstein 1905 yılına kadar hiçbir ciddi fizikçinin bilmediği, üniversite yıllarında onu tanıyan hocalarının ise pek önem vermediği bir kimseydi. Zürih Federal Tek-noloji Enstitüsü'nü bitirdiği 1900 yılından, matematikçi bir sınıf arkadaşının (Marcel Grossman)

babası onu 1903’te Bern’deki Federal Patent Bürosu’na yerleştirene kadar doğru dürüst bir işi bile yoktu. Ama kendi kendine çalışarak, önce doktora tezi olarak molekül büyüklüklerine ilişkin bir çalışma hazırladı; sonra da 1905 yılında sırasıyla **fotoelektrik olay** (ışık kuantumunun yeniden keşfi), **Brown hareketi** (ısıl olayların moleküllerin varlığına bağlı oluşunun kanıtı) ve **hareketli cisimlerin elektrodinamiği** (özel göreliliğin ortaya konuluşu) üzerine peş peşe üç makale yayımladı. Ardından da kütle ile enerji arasındaki ilişkiyi ortaya koyan **“Eylemsizlik cisimlerin enerji içeriğine mi bağlıdır?”** adlı makalesini yayımladı. Daha sonra, 500 yıl evvel Galileo Galilei’nin biçimlendirdiği “serbest düşen cisimlerin ivmeleri aynıdır” ilkesinde saklı olan çekim ve eylemsizlik kütlelerinin eşitliği olgusunu bir “özdeşlik” olarak ele alarak, 1915 yılına kadar genel görelilik kuramını geliştirdi. İlginçtir, bunda gereksindiği çok boyutlu ve Öklidyen olmayan geometriyi, gene arkadaşı Marcel Grossman’ın yardımıyla öğrendi. Daha sonraları kuantum fiziğine ciddi bir-iki katkı yaptı; ancak, Werner Heisenberg ve Erwin Schrödinger’in oluşturdukları kuantum mekaniğinin Max Born tarafından getirilen olasılıklı yorumunu bir türlü benimsemeyerek, ömrünün sonuna dek görelilik kuramlarına dayanacak bir “birleştirilmiş kuram” elde edip bunun yerine koymaya beyhude uğraştı.

Einstein’ın ilginç kişiliği çocukluğunda belirmeye başlamıştı. Fizik ve matematiğe ilgisinin uyanmasını da gene çocukluğundaki olaylara bağlayabiliriz:

> ...Evde annesi ona keman çalıştırıyordu. Bundan hoşlanmıştı ve iyi çalıyordu; bu da hayatı boyunca bırakmadığı bir alışkanlık olacaktı. Albert’in babasının ana gailesi ekonomik durgunluk ortasında aile işletmesinin yürümesini sağlamaktı. Ama kırk yılda bir oğlunun uzaktan da olsa fenle ilgisini uyandırmaya girişiyordu. Bir gün oğluna bir pusula gösterdi. Albert iğnenin neden hep aynı yönü gösterdiğini sordu. Hermann bunun manyetizmadan ileri geldiğini söyledi. Ama Albert manyetizmanın uzayı nasıl aştığını öğrenmek istedi. Buna Hermann’ın verecek bir yanıtı yoktu.
>
> O gece Albert görünmez bir kuvvetin uzayı nasıl aştığını düşünüp durduğu için gözüne uyku girmedi.
>
> Aynı sıralarda “Jakob Amca” küçük çocuğu cebirle tanıştırdı. “Bu bir neşeli bilimdir,” diyordu. “Avına çıktığımız hayvanı bulamadığımızda buna geçici olarak *x* deriz ve avımızı torbaya atana dek avlanmaya devam ederiz.” Bertl (küçük Albert) buna kısa zamanda kendini kaptırdı.
>
> 1891’de Einstein 12 yaşındayken sahneye bir diğer amatör öğretmen çıktı. O günlerde orta Avrupa’daki Yahudi ailelerinde cemaatin yoksul mensuplarından birisini Perşembe günleri

yemeğe çağırma geleneği vardı. Einstein ailesi bir tıp öğrencisi olan Max Talmey'i çağırmıştı. Max genç Bertl'e popüler bilim kitapları ödünç veriyor, onun zaten pek aktif olmayan beyni de bunları çabucak yutuyordu. Burada da Einstein hayatı boyunca sürecek bir alışkanlık ediniyordu. Büyük ölçüde hep kendi kendisinin öğretmeni olmuş, öğretmenlerini pek dinlememişti. Kendi ilgilerinin peşinden gitmiş ve her şeyi kendi istediği gibi yapmıştı. Sonuç olağanüstü bir bilgi derinliğinin yanı sıra en basit sınavlarda bile sık sık karşılaşılan zorluklar oldu.

Max Talmey çok geçmeden Einstein'a düzlem geometri kitapları getiriyor, çocuk da hiç vakit yitirmeden kendisine matematik öğretiyordu. Her hafta Max genç Albert'in ilerlemesini yokluyordu, ta ki sonunda "Artık onu izleyemiyorum" diyerek pes edene dek. Nafile bir çaba olarak Max ona tıp ve biyoloji kitapları da okutmak istediyse de, Albert ilgilenmedi. Bunlar yeterli bir entelektüel zorlama getirmiyordu: O yalnızca karmaşık kavramları ve artlarındaki ilkeleri kavramaya ilgi gösteriyordu...(*)

Sonraları anlattığına göre, özel göreliliğin temelini oluşturan ışık hızının değişmezliğini düşünmesine, gençliğinde aklına gelen bir soru -son sınıfa gelirken Münih'teki gimnazyumdan derslerdeki ilgisizliğinden dolayı çıkarıldıktan sonra, ailesinin yaşamakta olduğu Milano Kenti'nden Alp Dağları'na yaptığı yürüyüşler sırasında buzullardan yansıyan Güneş ışınlarının yol açtığı "Bir ışık ışınına yetişirsem ne olur?" sorusu- yol açmış. Bu sorunun kuram geliştikten sonra bulunan yanıtı çok basit: Yok olur!

Einstein'ın tüm biyografileri onu "aktif bir barışçı" olarak niteler. Çocukluğundan başlayan bu karakteri onun gimnazyumdan çıkarılmasına da yol açmıştı. Oysa dünyaca ününde 1. Dünya Savaşı'nın önemli rolü olmuştu. Genel görelilik kuramını geliştirmek için çalışırken, 1912'de ışığın kütleçekimine uğrayacağını anlamış ve bu konuda olası bir gözlemin sonuçlarını hesaplamıştı. Ancak savaş yüzünden bu gözlem yapılamadı. Einstein 1915'te kurama son şeklini vererek, ilk hesaptaki bir eksikliği giderdi ve farklı bir sonuç çıkarttı. 1919'da yapılan gözlemler bu yeni sonuca uygun çıkınca; bunun duyulmasının ardından iki gün içinde bütün dünya Einstein'ı tanır oldu.

1. Bölüm - GİRİŞ ve GENEL KAVRAMLAR

1- **Görelilik kuramı nedir?**

- *Görelilik kuramı nedir?*

- Bana göre olan ile **sana göre** olan ne bakımdan aynıdır, ne bakımdan farklıdır? Farklı olan tarafların **bana göre** ve **sana göre** görünümleri birbiriyle ilişkili midir? Evet ise, bu ilişki nedir?

Biraz somutlaştırmak gerekirse, bana göre hızla giden bir araba, sen giden bir otobüste otururken, sana göre ne yapıyordur? Benim falanca frekansta duyduğum sesi ya da gördüğüm ışığı, sen hangi frekansta duyar ya da görürsün? Duyar ya da görür müsün? Bunları, yani senin olayları nasıl gördüğünü/duyduğunu, sana sormadan bilebilir miyim? Sen ve ben bir arabanın, kuşun, merminin... hareketini, ışığın ya da sesin davranışını aynı şekilde mi **anlarız**?

Görelilik kuramı, bu soruların cevaplarını araştıran bir düşünce disiplinidir. Ancak, bu soruları yalnızca fizik (dolayısıyla doğabilimleri) açısından ele alır, felsefi yönleriyle ilgilenmez.

2-**Bu kurama neden ihtiyaç var?**

- Hareket eden kişi, diğer hareketlinin hareketini yanlış görür, doğrusu duran kişinin gördüğüdür gibi geliyor bana..

- Duran kişi mi? Kimin durduğunu söyleyebiliriz ki? Bize durağan gibi görünen şu dağlar, dünyanın ekseni etrafında saatte yaklaşık 1300 km hızla[1] dönmüyor mu?

1 1)Türkiye'nin enleminde.

- Peki dünyanın merkezi durağan mı diyeceğim, o da Güneş'in etrafında dönüyor diyeceksiniz...

- Hem de saniyede 30 km hızla. Dikkatini çekerim, saatte değil, **saniyede**...

- Güneş...

- O da saniyede 220 km hızla gökadamızın (Samanyolu) merkezinin etrafında dönüyor...

- Bu nereye kadar böyle devam edecek?

- Bilmem... Ama bir önemi yok. Göreliliğin ana fikri, bunun bir öneminin olmaması zaten. En azından, özel görelilikte sabit hızlı ve yönlü hareketlerin—

- Yani kimseye durağan diyemiyoruz, dolayısıyla—

- Ayrıcalıklı gözlemci yok. Tüm gözlemciler eşit.

- Nasıl tüm gözlemciler? Nasıl eşit?

- Birbirlerine göre **sabit hızla ve sabit yönde** (daha kısa, ama matematiksel deyişle, sabit vektörel hızda) hareket eden tüm gözlemciler eşdeğerdir. Şu anlamda: Yaptıkları gözlemler sonucunda aynı doğa (fizik) kurallarına varırlar. Yani doğru fizik kurallarını bulabilmek -ve sonra uygulayabilmek- açısından, hiçbir gözlemci ayrıcalıklı değildir; hepsinin buldukları kurallar aynı derecede doğrudur, çünkü aynıdır.

Yalnız burada iki hususu vurgulamam gerek: Birincisi, **sabit bir hızla dönen gözlemci, bu eşdeğerlik sınıfına girmez:** 900 km/h hızla bile giderken, türbülanssız bir bölgede uçan bir uçağın içinde, bir anormallik hissetmeden dolaşabilir, yiyip içebilir, istersek (ve uçak bize aitse) masa tenisi bile oynayabiliriz. Ama bunların hiçbirini, dönen bir atlıkarınca platformu üzerinde yapamayız. Demek ki, örneğin masa tenisi topu uçakta, yerde sabit olduğumuz durumdaki ile aynı şekilde hareket ediyor; ama dönen platformda farklı şekilde. Aynı şey bardaklarımızdaki sıvıların davranışı için de söz konusu. Sonuç olarak, uçakla birlikte sabit vektörel hızla hareket eden

gözlemci(ye göre olaylar) yerdekine eşdeğer, platform ile birlikte düzgün dairesel hareket yapan gözlemci(ye göre olaylar) yerdekine eşdeğer değil.

- Tabii olmaz. Merkezkaç kuvveti var.

- Hayır, yok. “Merkezkaç kuvveti”, fiziksel bir kuvvet değildir, “zevahiri kurtarmak” için uydurulan bir şeydir. Ama bunu daha sonra konuşşak (Soru 11’de), daha iyi...

- Peki, öyle olsun... İki konuyu vurgulayacaktınız.

- İkincisi, de şu ki, sabit vektörel hızla hareket eden gözlemcilerin buldukları **kurallar** aynıdır dedim, ama **gözlemleri** aynıdır demedim. En basitinden, uçak gözlemcisine göre sabit olan bir cisim (örneğin uçağın bir koltuğu) yer gözlemcisine göre hareket halindedir.

- Biraz somutlaştırsak da gözlem, gözlemci, kural kavramları biraz netleşse...

- Tabii, bizim kültürümüzde analoji önemlidir, değil mi? O yüzden bizde bol bol atasözü, darbımesel kullanılır, mesel anlatılır. Bu da bizim meselimiz olsun:

Meraklı bir çoban varmış. Koyunlar yumuşak huylu, pek sorun çıkarmayan yaratıklar olduğundan, çobanın merak ettiği şeyler üzerine düşünmeye bol bol vakti olurmuş.

Gel zaman, git zaman, havada hareket konusuna merak sarmış. Önce bir müddet kuşları gözlemiş. Ama onların hareketlerini fazla karmaşık bulmuş. Sonra bir gün, kargaların yakındaki ceviz ağacının dibinden alıp, kırmak için yüksekten yere bıraktığı cevizlerin hareketlerinin daha basit olduğunu fark etmiş. Bu daha basit olguyla başlamaya karar verip, cevizlerin olgunluk mevsiminde, uygun bir noktadan ağacı, kargaları ve cevizleri gözlemeye başlamış.

Tabii öyle sırf bakmakla olmaz, verileri kaydetmek lazım. Bu iş için bir dijital fotoğraf makinesi edinmiş, her yarım saniyede bir çekim yapmaya ayarlamış ve bir karga cevizini bıraktığı anda deklanşöre basıp, ceviz yere düşene kadar çekmeye devam etmiş. Her ceviz için, fotoğraflardan cevizin ağaçtan yatay ve yerden düşey mesafesini ölçüp Tablo 1’in bir benzerini yapmış.[2] *Tabii ki verilerin sağlıklı olması için fotoğrafları hep aynı yerden ve objektifin en az geniş ayarıyla çekmiş. (Böylece perspektif hatasını azaltıyor.)*

2) Lise ve üstü öğrencileri için: Tabloda, her *t* değerine yalnız bir *x* ve bir *y* değerinin karşılık geldiğini (tersi geçerli değil, örneğin 35 m *y* değerine hem 0, hem 2,0 s karşılık geliyor) ve bir zaman aralığında her *t* değerine mutlaka birer *x* ve *y* değerinin karşılık geldiğini göreceksiniz. Tabii bu, zamanın doğası gereği; ama aynı zamanda matematik dersindeki fonksiyon tanımıyla örtüşüyor, değil mi? Yani çoban, cevizin yatay ve düşeydeki konumunu zamanın fonksiyonu olarak bulmuştur; bir cismin hareketi ile ilgili temel veri kümesi işte bu fonksiyonlardır, bunlara **konum**

fonksiyonları (Ünv: Üç boyutta *x*(*t*), *y*(*t*), *z*(*t*)'nin bir araya gelip meydana getirdiği vektör fonksiyona **konum vektörü**) deriz.

Zaman: *t* (s)	Yatay: *x* (m)	Düşey: *y* (m)
0	2	35
0,5	3	39
1,0	4	40
1,5	5	39
2,0	6	35
2,5	7	29
3,0	8	20
3,5	9	9

Tablo 1. Bir cevizin uçuş verileri.

Tüm tablolarında şunu görmüş: Tabloda yukarıdan aşağıya gelindikçe x'deki değişim aşağı yukarı sabitmiş, ama y'deki değişim azalıyor, pozitif başlasa bile, negatif sayılara doğru gidiyormuş. (Tablo 1'de x değişimlerinin hepsi +1, y değişimleri +4, +1, -1, -4, -6, -9, -11.) Ancak, y'deki değişimlerin farklarını aldığında (Tablo 1 için -3, -2, -3, -2, -3, -2. Burada 1'den 4'ü çıkararak ilk -3'ü, -1'den 1'i çıkararak takip eden -2'yi bulduk vb.), fazla değişmeyen sayılar buluyormuş. Bir sürü tablo inceleyerek bu y değişiminin değişiminin sabit olması gerektiğini, Tablo 1 için bulduğumuz rakamların, örneğin -3 ile -2 arasında oynamasının gerçek bir değişim olmayıp, yalnızca verilerin yeterince hassas olmaması ve gerçek sabit değerin bu iki değer arasında olmasından kaynaklandığını bulmuş.

Otlaktan geçen bir tren yolu varmış, çobanın bir arkadaşı bu trende makinist olarak çalışıyormuş. (Bkz. Şekil 1.) Çoban, keşfini arkadaşıyla paylaşmış, anlattıkları arkadaşının çok hoşuna gitmiş. Makinist de kendi fotoğraf makinesini lokomotife sabitlemiş, aynı yerde ceviz bırakan bir karga görürse, o da aynı şekilde fotoğraf çekip, tablolar yapmaya başlamış. Ancak, ağaç hareket yüzünden flu çıktığından, makinist yatay mesafeyi (yani x değerini) fotoğrafın sol kenarından ölçmeye karar vermiş.

Makinist de aynı sonuca varmış. Yani her ceviz için x değerinin fotoğraftan fotoğrafa aynı miktar değiştiğini (ama genellikle negatif olduğunu), y değerinin değişim miktarının ise fotoğraftan fotoğrafa sürekli negatif yönde değiştiğini bulmuş. Üstelik, bu "değişimin değişimi" miktarı, çobanın bulduğu ile aynı imiş!

Bunu aynı bulunca, ikisinin gözlemleri arasında başka ne ilişkiler olabileceğini merak etmişler. Kasabadaki kütüphaneye gidip biraz kitap karıştırınca, -hava direncinin ihmal edilebildiği durumlarda- tüm cisimlerin düşey boyutta aynı ivmeyle düştüğünü bulduklarını anlamışlar. Çoban

Şekil 1. Çoban, makinistin treni ve bir karga. Çizim: Barış Mengütay.,



kitaplardan birini ödünç almış ve buradan, aynı ceviz için kendisinin ve makinistin tuttukları tabloları birbirlerine dönüştürebileceğini öğrenmiş.

Düşen cevizlerin hareketinin çoktan çözülmüş olduğunu anlayınca, iki kafadar, daha zor bir şey inceleyelim deyip, kargaların kendilerini gözlemlemeye başlamışlar; donanımlarını da iyileştirerek gözlem süresini uzatmışlar. Ancak, kargalar kanatları sayesinde sürekli yön değiştirdikleri için, hareketleri hakkında kural bulmak cevizler kadar kolay değilmiş; galiba hâlâ bulmaya çalışıyorlarmış kargaların hareket kurallarını.

Bu meselin bizi ayrıca ilgilendiren bir ara adımı da var:

Az önce bahsettiğim dönüşümü öğrendikten sonra, her ihtimale karşı, makinist ceviz ağacının hizasına geldiği anda, ikisi de kronometrelerini sıfırlamayı âdet edinmişler. Nitekim bir gün, tren geçtiği sırada koyunlardan birinin doğumu başlamış, çoban onunla ilgilendiği için gözlemini yarım bırakmak zorunda kalmış. Sevimli kuzu doğduktan sonra biraz düşünmüş, sonra cep telefonunu çıkarıp, makinisti aramış.

“Kusura bakma, bugünkü karganın verilerinin bir kısmını kaçırdım, senin verilerini alabilir miyim?”

“Vereyim vermesine ama, benim verilerim sana uyacak mı ki? Sana göre ileri giden kargalar bile bana göre geri gidiyor.”

“Dönüşümü hatırla,” demiş çoban, “uydururuz.”

“Peki. Gerçi benim o dönüşümü anlayacak kadar inceleme fırsatım olmadı, işi yaptıktan sonra bana da anlat. Hem sende GPRS ya da 3G var mıydı, istersen e-posta eklentisi olarak yollayayım…”

Çoban, verileri aldıktan sonra, tablonun her satırına, birkaç basit işlemden oluşan dönüşümü uygulamış ve kendisi gözlem yapmış gibi, tablosunu tamamlayabilmiş. Zaten makinistin verilerinin ilk kısmı kendisinin koyunun doğumu başlamadan önce yapabildiği gözlemle aynı zamana denk geldiği için, dönüşüm işlemini doğru yapıp yapmadığının sağlamasını da yapması mümkün olmuş.

- Bakalım “kıssadan hisse” çıkarabilecek miyim:

1. Bir cismin hareketinin gözlemi, mümkün olduğu kadar çok t anında, cismin örneğin yatayda, düşeyde ve derinlik yönünde x, y, z konumlarının [matematik diliyle $x(t)$*,* $y(t)$*,* $z(t)$ *fonksiyonlarının] belirlenmesidir.*

2. Birbirine göre sabit (vektörel) hızla hareket eden iki gözlemci, aynı cisim ya da cisimleri inceledikleri zaman, aynı kuralları bulur. [Meselde cevizin (a) yataydaki hızının sabit olması, (b) düşeydeki hızının her saniye yaklaşık aynı miktarda negatife gitmesi.]

3. Ancak, veriler farklı olabilir. (Meselde cevizin yataydaki sabit hızının çobana göre bir değer, makiniste göre başka bir değer olması.)

4. Bu iki gözlemcinin elde ettikleri veriler, birbirlerine dönüştürülebilir. Dönüştürme yöntemi, veri kümesinden bağımsız, ama bir gözlemcinin diğerine göre hızına bağlıdır.

- Doğru. Senin ikinci ve dördüncü maddelerin, göreliliğin özünü oluşturuyor.

3- **Galileo göreliliğiyle Einstein özel göreliliği arasındaki ilişki nedir?**

- İyi ama, şimdiye kadar hiç Einstein'dan bahsetmedik?

- Görelilik kavramı, çoğu kişinin zannettiğinin aksine Einstein ile değil, Galileo ile başlar. Galileo'dan Einstein'a kadar görelilik, hareket yasalarının bir özelliği olarak düşünülüyordu. Einstein ise bunun bir **bilimsel ilke** olması, yani **tüm** doğa yasalarının bu özelliğe sahip olması gerektiğinde ısrar etti.

Galileo/Newton zamanında elektromanyetizma yasaları bilinmiyordu. Sonraki yüzyıllarda bu yasalar keşfedildi, üstelik—

- Ne yasaları???

- Elektromanyetizma. Yani elektrik ve manyetik kuvvetler, dolayısıyla alanlar, elektrik yükler ve elektrik akımlar arasındaki ilişkileri betimleyen yasalar. Bazılarını duymuş ya da öğrenmişsindir; Coulomb ve Faraday yasaları gibi...

- Doğru, bunları biliyorum...

- Üstelik, elektromanyetizma yasalarının optik alanını da kapsadığı ve ışığın bir elektromanyetik dalga olduğu da anlaşıldı. Ancak bu yasalar, hareket yasalarının sahip olduğu görelilik özelliğine sahip değillerdi, yani bir gözlemcinin gözlemlerine, önceki soruda bahsettiğim (hani çoban, makinistin verilerini dönüştürmüştü, ama nasıl yaptığını matematiksel olarak açıklamamıştım) dönüşüm uygulandığında, aynı yasalarla uyumlu veriler -bir başka deyişle aynı yasalar, çünkü bir bakıma yasalar verilerin özetidir- çıkmıyordu.

Çoğu bilimci buna "Elektromanyetizma yasaları görelilik özelliğine sahip değil. Ne yapalım, öyleymiş demek" diye özetleyebileceğim şekilde yaklaşırken, Einstein bu durumun kabul edilemez olduğunda ısrar etti. "Eğer elektromanyetizma yasaları uygun şekilde dönüşmüyorsa, -ve bu yasalar doğruysa- dönüşüm yapılma **fikri** değil, dönüşüm **yöntemi** yanlış olmalıdır" sonucuna vardı ve elektromanyetizma yasalarına görelilik özelliği sağlayan yeni bir dönüşüm yönteminin kullanılması gerektiğini söyledi.

Öte yandan bu yeni dönüşüm de, Galileo-Newton hareket yasalarına görelilik özelliği sağlamıyordu. Bu durumda, eğer Einstein gibi görelilik konusunda ısrar edeceksek, hareket yasalarının da değişmesi gerekiyordu. Bu yeni hareket yasaları ve yeni dönüşüm yöntemi bir araya gelince, zamanın da göreli olması, ışık hızının sınır

olması, kütle-enerji eşdeğerliği gibi herhalde az buçuk duymuş olduğun çeşitli devrimsel sonuçlar çıktı ortaya.

İşte hem bu çarpıcı sonuçlar yüzünden, hem de göreliliği ısrarla bir **bilimsel ilke** olarak, yani bilimsel yasadan daha önemli kabul ederek vurgulaması yüzünden Einstein'ın ismi görelilik ile bu denli özdeşleşmiştir.

Tabii ki kimsenin ısrarıyla bilimsel yasa ya da ilke olmaz. Nihai onaylayıcı deneydir, gözlemdir. Ve bu yeni dönüşüm ile uyumlu yasalar, yani elektromanyetizma ile yeni hareket yasaları, Einstein zamanından bu yana tüm testlerden başarıyla geçmiştir.

4-Ya Einstein'ın Newton'u yanlışladığı gibi yarın birisi de Einstein'ı yanlışlarsa?

- *Ya Einstein'ın Newton'u yanlışladığı gibi yarın birisi de Einstein'ı yanlışlarsa?*

- Bu, bilimin nasıl geliştiğini anlamayan çoğu kimsenin düştüğü bir yanılgıdır; postmodern bir şey diyorlar ama... Bir kere, bir bilimsel yasanın yanlışlanması diye bir şey olamaz. En azından, bilimsel yöntemin yaygınca kullanılmaya başlamasından beri bu böyle...

- *Nasıl yani, Newton mekaniği yanlış değil mi şimdi?*

- Tabii ki değil. Örneğin, Jüpiter, Satürn, Uranüs ve Neptün'ün yanlarından geçen Voyager II uzay aracının yörünge hesaplarında NASA tamamen Newton'un hareket ve genelçekim yasalarını kullandı ve 12 yıl ve yaklaşık 5 milyar km'lik yolculuktan sonra, hata yalnızca bir saniye mertebesindeydi. Yani NASA'nın bu hesaplar için Einstein'a, bir diğer deyişle özel ya da genel göreliliğe ihtiyacı yoktu.

- *Biraz kafam karıştı... Newton ile Einstein aynı şeyi söylemiyorlar, değil mi?*

- Hayır, söylemiyorlar...

- *Ama aynı konudan bahsediyorlar, değil mi? Hareketten.*

- Başka şeylerden de bahsediyorlar ama, yalnızca hareket konusunu göz önüne alalım şimdilik...

- *Aynı konuda, birbirinden farklı iki şeyin ikisi birden doğru olamaz ki!*

- Diyelim ki bir otomobiliniz var, bir de dörtçeker arazi aracı aldınız. Otomobil birdenbire işe yaramaz, bir yere gidemez hale mi gelir?

- *Tabii ki hayır...*

- Otomobille eskiden ne yapıyorduysanız, aynısını hâlâ yapabilirsiniz, değil mi? Peki otomobiliniz varken dörtçeker aracı niçin alırsınız?

- *Ya gösteriş için...*

- Ya da...

- *Ya da... otomobili kullanamayacağımız bazı yer ve zamanlarda kullanmak için.*

- Aynen öyle... Otomobilin bazı sınırları vardır, ancak normal yollarda ve aşırı olmayan hava koşullarında kullanabilirsiniz. Ama dörtçeker aracı hem otomobili kullandığınız yer ve koşullarda kullanabilir, hem de bunların ötesine geçebilirsiniz. Örneğin araziye ya da karlı günlerde trafiğe çıkabilirsiniz. Peki neden herkes dörtçeker araç kullanmıyor?

- *Daha pahalı da ondan!*

- Yalnızca daha pahalı değil... Aynı zamanda dörtçeker sistemi yüzünden daha karmaşık. Bu yüzden, bakım maliyeti daha yüksek. Yine dörtçeker sistemi hem sürtünmeyi hem de ağırlığı arttırdığından, yakıt tüketimi de daha fazla.

- *Dolayısıyla, eğer otomobil işinizi görüyorsa, dörtçeker araç almazsınız...*

- Bilimsel kuramlar da böyledir. Yenisinin geliştirilmesi eskisini geçersiz kılmaz, eski kuram kendi sınırları içinde geçerliliğini ya da faydalılığını sürdürür; bir bakıma bu ikisi aynı şeydir zaten. Eski ve yeni kuramların bakış açıları taban tabana zıt da olsa, aralarında çok büyük kavramsal farklar, Kuhn’un deyişiyle “paradigma kayması” da olsa, bu faydalılık değişmez, çünkü bir önceki sorunun yanıtında söylediğim gibi, eski kuram eğer uzun bir süre geçerli kabul edildi ise, bir sürü deneysel/gözlemsel testlerden başarıyla geçmiş olması gerekir. Yeni bir kuram geliştirildi diye bütün bu testlerin sonucu değişecek değil elbette. Yani elimden şu anahtarlığı bırakırsam düşer, yarın-öbür gün yeni bir genelçekim kuramı geliştirilirse, birdenbire düşmekten vazgeçmeyecek.

- *Peki düşen bir taşın hareketini eski yasa ile hesaplayacağım. Yeni yasa ile neyi hesaplayacağım?*

- İstersen taşın düşüşünü de yeni kuram ile hesaplayabilirsin, ama matematiksel işlem genellikle eski kuram çerçevesinde yapacağından daha karmaşık olacaktır, otomobille gidebileceğin bir yere dörtçeker araç ile de gidebileceğin, ama genellikle daha fazla yakıt tüketeceğin gibi...

- *Taşın düşüşü bizim hangi yasayı kullandığımızdan bağımsız olduğuna göre, iki yasa da aynı sonucu verecek, değil mi?*

- Tabii ki pratikte aynı rakamsal sonucu verecekler. Yani örneğin Tablo 1 benzeri verileri öngörmek için iki kuram ile birer hesap yapılsa, varılan sonuçlar ya tam aynı, ya da aralarındaki fark deneysel olarak ölçülemeyecek kadar küçük olacaktır. İlk saniyede taşın düşüşü için bir kuramın 5,00000, diğerinin 5,0000000000002 m öngördüğünü düşün. Elindeki metre çubuğunun en küçük bölmeleri birer milimetre ise, pratikte iki kuram aynı sonucu vermiş demektir.

Zaten bu beklenti, bir yeni kuramın geliştirilmesinde mihenk taşı görevini görür. Bazı durumlarda gözlem veya deneyler mevcut kuramın öngörülerinden farklı sonuçlar verirse, yeni kuram geliştirmek gerekir. Bu sınır durumlarda yeni kuramın öngörülerinin gözlem ve/veya deney sonuçlarıyla uyuşması istenir, ama eski kuramın zaten uyuştuğu durumlarda da, gözlem ve/veya deney sonuçlarıyla, dolayısıyla eski kuramla uyuşması gerekir.

- *Anladım. Hatta bir analoji de ben düşündüm: Kullandığımız bir bilgisayar yazılımının daha ileri bir versiyonu çıktığı zaman eskisi kullanılmaz hale gelmiyor. Örneğin bu bir kelime-işlem yazılımı ise, yine eskisini yazmak için kullanabiliyorum. Ancak yenisiyle, eskisiyle yapamadığım bazı şeyleri de yapabiliyorum. HTML ya da pdf gibi farklı formatlarda kaydedebilmek, web bağlantısı koyabilmek gibi.*

Yahut yazılım bir oyun ise, örneğin bir otomobil yarışı oyunu; yenisinde daha fazla parkur, daha fazla otomobil, daha gerçeğe yakın grafikler oluyor. Yeni doğa yasasının eskisinden daha kapsamlı, ve aynı olaydan bahsederken gözlem ve/veya deneye daha yakın öngörülerde bulunması gibi. Ama yazılımımı güncellemesem de eski versiyonunu oynamaya devam edebilirim, o yeni parkurlarda ya da yeni otomobillerle oynamak istemediğim

sürece. Tabii bir futbol oyunu yazılımı için de benzeri şeyler söylenebilir.

- Evet, bu analojiyi beğendim. Hatta yeni versiyonu görünce bazen eskisinin gözümüze kötü görünmesi gibi, zamanla deney/gözlem hassaslığı artınca eski ve yeni kuramların öngörüleri arasındaki fark, eskisinin geçerlilik alanında da ölçülebilir hale gelebilir.

Ayrıca bizim otomobil/dörtçeker araç benzetmesini bir adım daha öteye taşıyabiliriz: Nasıl yolun bittiği yer otomobilin sınırıysa, örneğin deniz kıyısı da dörtçeker aracın sınırıdır. Bir sonraki kuramın benzeri de bu durumda hovercraft oluyor...

- *Sonuçta, yeni yasanın geçerli olduğu durumların bir altkümesi için, pratikte eski yasa da geçerli. Peki bu sınırı nereden bileceğim?*

Bu sorunun genel geçer bir yanıtı yok. Bazen eski kuram kendisi bize hangi sınırdan sonra geçerli olamayacağının belirtilerini verir, bazen ise buna ancak ikisi arasındaki matematiksel ilişkiyi inceleyerek karar verebiliriz. Örneğin ışık hızının yüzde 5'i ile giden cisimler için özel görelilik yerine Newton kuramıyla yapılacak hesaplarda hata yüzde 0,1 (binde bir) mertebesindedir; hız ne kadar küçükse hata da o kadar küçüktür. Bu yüzden NASA Voyager II için özel görelilik kullanmadı: Yolculuğu boyunca Voyager II'nin ulaştığı en yüksek hız bile ışık hızının binde birinden azdı.[3]

3) 2010 itibarıyla insan yapısı bir aracın ulaştığı en yüksek hız, Helios 2 uzay aracının, yörüngesinin Güneş'e en yakın noktasında ulaştığı saniyede 70 km'lik hızdır; bu da ışık hızının binde birinden küçüktür.

- *Yalnız deminden beri ben yasa diyorum, siz kuram. Neden?*

Ah, evet. Bilimciler ile genelde kamuoyu, özelde politikacılar arasındaki iletişim probleminin bir öğesine parmak bastın. Biz bilimciler, özellikle fizikçiler için kuram ya da teori, öyle sanıldığı gibi basit, dayanaksız bir iddia anlamına gelmez. Kuram, doğanın bir kısmını betimlemek iddiasında olan, hem kendi içinde, hem de o zamana kadar bilinen deneysel/gözlemsel verilerle tutarlı bir mantıksal -fizikte genellikle matematiksel- yapıdır. İyi bir kuramın, henüz yapılmamış bazı deney ve gözlemler için **yanlışlanabilir** öngörülerde bulunması beklenir. Bu deney ve gözlemler yapıldığında sonuçlar öngörülerle uyuşmazsa, kuram çöpe atılır; uyuşursa, kabul edilmeye doğru yol almış olur. Yeterince fazla sayıda ve uzun

zamanda gözlemsel/deneysel verilerle uyumu bozulmazsa, kabul edilmiş kuram -bir diğer deyişle yasa- mertebesine ulaşır.

- *Ne kadar zaman? Ne kadar gözlem/deney?*

- Bu uzun soluklu bir süreçtir ve ne kesin bir ölçüsü, ne de "Bu yasadır, şu değildir" diye deklarasyon yapacak bir merkezi merci, bir "Doğa Yasaları Anayasa Mahkemesi" vardır. Bazılarını bir kritik deney ikna edebilirken, bazıları inatla yeni kurama karşı durur, daha fazla deney yapılmasını talep eder.

Dolayısıyla bir kuramın genel kabulü bazen çok uzun sürdüğü için, "kuram" sıfatı yapışıp kalabiliyor. Onun için biz bilimciler kendi aramızda "yasa" kelimesini pek kullanmayız, en azından 50 yıldır kabul gördüğü halde "genel görelilik kuramı", hatta bazen "Newton'un mekanik kuramı" deriz. Öte yandan, henüz hiçbir deneysel desteği olmayan büyük birleştirme kuramları, sicim kuramları vb. de vardır. Hangisinin yeterince deneysel testi sağladığını, hangisinin testlerinin henüz yapılamadığını ya da yeterince sayıya ulaşmadığını biz bildiğimiz için, aramızda sorun olmaz. Ama bazen biz, genel kabul görmüş bir kuramdan kısaca "kuram" diye söz edince, "halkla ilişkiler" sorunları oluşabiliyor.

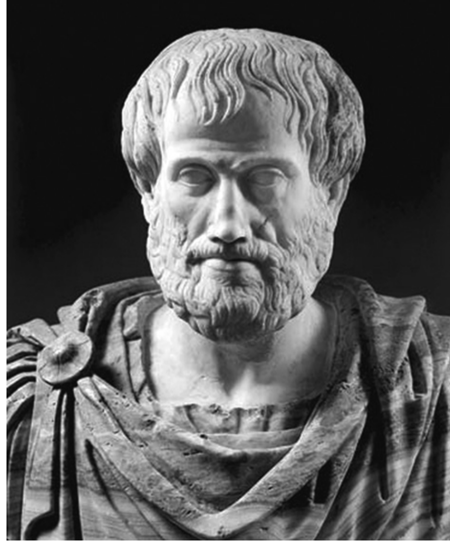
- *Yine de genel kabul gören kuramları diğerlerinden ayırt edecek bir sıfat/isim olmalı bence.*

- Aslında, galiba var. Son zamanlarda bir konudaki o sırada kabul gören kurama ya da kuramlar kümesine (bazen her şeyi açıklamaya tek kuram yetmeyebiliyor), o konunun "standart modeli" denmeye başladı. Örneğin, "parçacık fiziğinin standart modeli", kuantum elektrodinamiği + zayıf kuvvet, kuantum kromodinamiği ve Higgs skalar alanı bileşenlerinden oluşuyor; "evrenbilimin (kozmoloji) standart modeli" ise, en azından şu anda, ΛCDM olarak ifade edilen[4] kozmolojik sabit ve "soğuk karanlık madde" bileşenlerinden.

4) Burada Λ, Yunan alfabesindeki büyük Lambda harfidir ve kozmolojik sabiti göstermektedir.

- *Bu bileşenleri de açıklayabilir misiniz diyeceğim ama...*

- Onların her biri için birer kitaplık diyalog daha gerekirdi...



Şekil 2. Aristoteles
(MÖ 384-322), en önemli Eski Yunan filozofu. Mantık, metafizik, güzel sanatlar, politika, etik, biyoloji ve fizik/kimya konusunda eserler vermiş, kendi eserleri ve kendisinden öncekilerin katkılarını bütün bu konuları içeren kapsamlı bir sistem haline getirmiştir. Fizik/kimya/astronomide öğretileri yaklaşık 18 yüzyıl neredeyse kanun olarak kabul edildi; ancak bugün, diğer konulardaki başarısının aksine, bu konularda hatalı olduğunu biliyoruz. Sisteminde görelilik yoktu.

2. Bölüm - GÖRELİLİK ÖNCESİ ve GÖRELİLİĞE GEÇİŞ

5- Görelilikten önce ne vardı?

- *Konumuz olan görelilik bağlamında o zaman Einstein özel göreliliği ve mekaniği, Newton mekaniği ve Galileo göreliliğinden sonra gelen kuram/yasa. Peki Galileo öncesi ne vardı?*

- İlkçağ filozoflarının, görelilik diye bir dertleri yoktu. Neden olsun ki?..

- *Bir dakika, bir dakika... Filozofların görelilikle ya da fizikle ilgisi ne?*

- **Filozof** kelimesinin orijinal anlamı, "bilgiyi seven"dir. İlkçağlarda insanlığın "bilimsel"[5] bilgi birikimi, bir kişinin, yeterince yetenekli ve istekli ise bu bilginin tamamını öğrenebileceği kadar azdı; dolayısıyla bu bilgilerle ilgilenen ve/veya bu bilgileri üreten kişilere "filozof" dendi. Yani fizikçi, kimyacı vb. ayrımlara gerek yoktu. Bu ayrımlar oluştuktan sonra, bilgi kavramının kendisi üzerinde çalışanlara filozof denmeye devam edilmiştir ama, ilkçağ filozofları hem günümüz anlamında filozof, hem fizikçi, hem kimyacı, hem astronom, hem biyolog, hatta bazen aynı zamanda mühendistiler.

5)Bilimsel kelimesinde tırnak kullanmamızın iki sebebi var: Birincisi, yemek pişirme veya avcılık usülleri gibi beceri veya "zanaat"ların beraberinde getirdiği bilgiyi kastetmiyoruz; bunların bütünü büyük olasılıkla taş devrinde bile bir kişinin kapasitesinin çok ötesindeydi. İkincisi, günümüzde bildiğimiz anlamda bilimsel yöntem, ilkçağlarda henüz yaygınlaşmamış olduğundan, bu bilgilerin bir kısmı günümüz kriterlerine göre bilimsel, hatta doğru bile olmayabilir.

- *Yani karpuzlar küçük olduğundan, bir koltuğa üç-beş karpuz sığdırılabiliyordu... Peki, neden görelilik dertleri yoktu?*

- Çünkü, onlar dünyanın evrenin merkezinde ve durağan olduğunu düşünüyorlardı. Bu durumda da senin ikinci sorunun başında dile getirdiğin “doğrusu duran kişinin gördüğüdür” iddiasındaki “duran kişi” kavramını sorgulamaya gerek duymadılar; çünkü **gerçek** ve **mutlak** bir “durağanlık hali” tanımlayabildiklerini düşünüyorlardı.

- Bunların en önemlisi Aristoteles’ti, değil mi?

- Evet. Aristoteles yalnızca kendi eserleri bakımından değil, yazdıklarıyla bize kendinden öncekiler hakkında bilgi vermesiyle de önemlidir. Örneğin, Eski Yunan filozoflarının Ay’ın evrelerini, Ay ve Güneş tutulmalarını, dünyanın yuvarlaklığını anladıklarını onun aracılığıyla biliyoruz.

- *Ben dünyanın yuvarlaklığı Kristof Kolomb ve Magellan ile anlaşıldı sanıyordum...*

- Bu yaygın bir yanılgıdır. Hatta Eratostenes adlı filozof, MÖ 200 civarında dünyanın yarıçapını ölçmüş, ortaçağ İs



Şekil 3. Aristoteles sisteminin kimyasına göre, cisimler bu dört elementin çeşitli birleşimlerinden oluşuyordu. (Sidney Harris’in bir karikatürü, *Chalk up another one* adlı seçkiden.)

lam astronomları bu ölçümün hassaslığını artırmışlardır. Bu halk tarafından genelde bilinmeyebilirse de, eğitimli kişiler tarafından

biliniyordu. Dolayısıyla, teorik olarak batıya giderek Çin’e ulaşılabileceği de apaçıktı...

- *Peki niye Kolomb’dan önce kimse bunu denemedi?*

- Gidilmesi gereken mesafeyi hesapladıklarında, gemiyle gidilmesi imkânsız bir mesafe buluyorlardı da ondan...

- *Nasıl yani? Neden bir geminin gidebileceği mesafenin sınırı olsun ki? Batmadıktan sonra gittikçe gider...*

- Açık denizde giden bir gemi, mürettebatın yiyeceğini ve suyunu da taşımak zorundadır. Hiçbir karaya uğramazsa, eninde sonunda bunlar biter; zaten yiyeceklerin de çoğu bozulur.

- *Peki Kolomb nasıl cesaret etti? Gemiye daha fazla yiyecek-içecek sığdırmanın yolunu mu buldu, ya da bir yiyecek saklama teknolojisi mi icat etti?*

- Hiçbiri. Dünyanın yarıçapını yanlış hesapladı; dolayısıyla Asya’ya olan mesafenin aslından çok daha kısa olduğunu zannetti.

- *Yani tam cahil cesareti desenize... Yani Avrupa’dan Asya’ya kadar deniz olsa, Amerika olmasa, açlık ve susuzluktan öleceklerdi. Şansa bak...*

- Her neyse, Aristoteles’den bahsediyorduk... Aristoteles’in hareket kuramının en önemli bileşeni, **nesnelerin doğal durumunun hareketsizlik olmasıdır.** Yani üzerinde herhangi bir etki bulunmayan bir nesne, birazdan doğal halini alır ve durur.

- *Neden?*

- Çünkü, Aristoteles’e göre nesneler, “ait oldukları yere” gitmek eğilimine sahiptir. Oraya varınca ya da kendi ait olduğu yere gitmeye çalışan başka bir nesneyle çarpışınca, dururlar. Buna “teleolojik yaklaşım” deniyor. Yani

-



Şekil 4. Yıldız izleri. Siz nasıl açıklardınız?

hareketi geçmiş ya da şimdiki zamanla değil, gelecek ile; "üzerine şöyle şöyle bir kuvvet etki ettiği için" değil de, "ait olduğu yere varabilmek için" diye açıklamaya çalışmaya...

- *Herhangi bir nesnenin nereye ait olduğu neye bağlı?*

- Bileşimine. Yani içinde hangi elementten ne kadar olduğuna. İlkçağ filozofları doğada dört element olduğunu düşünüyorlardı: Toprak, su, hava ve ateş. Toprak, yerin merkezine gitme eğilimi en güçlü olandı, sonra su geliyordu. Ateşin eğilimi ise aksi yöne, göğe ulaşmaktı; hava da bunların arasındaydı. Örneğin bir taşın suda batması, taşın aşağıya gitme eğiliminin suyunkinden güçlü olmasıyla, ısınan havanın yükselmesi de ısıtırken içine ateş katmış olmakla açıklanıyordu.

- *İlkçağ kimyası bayağı basitmiş. Yalnızca dört element...*

- Evet ama, sonsuz sayıda oranla birleşebileceğini düşünmek zorundasın. Halbuki bugün biliyoruz ki yüz küsur element var, ama

belli oranlarda birleşiyorlar; su için bir mol oksijene iki mol hidrojen gibi.

- *Bu Dalton yasalarıydı, değil mi? Ama eskiler bir de beşinci elemente inanmıyorlar mıydı? Hatta filmi bile var...*

- Evet. Çünkü gökyüzündeki cisimlerin hareketi, her şeyin durmaya gideceği şablonuna uymuyor...

- *Gökyüzündeki hangi hareket? İlkçağlarda astronomik gözlem yapabiliyorlar mıydı ki?*

- En azından Ay ve Güneş doğup batmıyor mu? Dolayısıyla, gökyüzünde hareket ediyorlar gibi görünüyorlar...

- *Ama bunlar gerçek hareket değil ki! Dünyanın dönüşünden kaynaklanıyor.*

- Eskiçağlarda bunu bilmiyorlardı işte. Tekrar ediyorum, onlar dünyanın evrenin merkezinde ve durağan olduğunu düşünüyorlardı, bu durumda Ay ve Güneş dünyanın etrafında dönüyor olmalıydı. Ayrıca yıldızlar da. Çünkü onlar da doğup batıyor.

- *Yıldızlar mı? Haydi Ay ve Güneş çok belirgin; ama kim o binlerce ışık noktasının arasında bir tanesinin hareketini saatlerce takip edecek ki? Neden? Hele ilkçağlarda?*

- Çeşitli sebepler var. Bir kere, insanoğlunun doğasında olan merak. Nedir bu nesneler? Ayrıca, bana bir faydası ya da zararı olabilir mi? İkincisi, birazdan anlayacağımız gibi, yıldızlara bakarak yön bulmak ve zamanı ölçmek de mümkün. Üçüncüsü de, yine birazdan anlayacağımız dinsel sebepler.

- *Peki, yıldızları takip edebilme problemi?*

- Bu da ilk anda aklımıza gelenden daha kolay. Örneğin, Büyük Ayı'yı bilirsin. Tek tek yıldızları değil, Büyük Ayı Takımyıldızı'nı takip edebilirsin. Hatta, yıldızların zaman içinde tutarlı bir şekilde takımyıldızlara ayrılabilmesi bile yıldızların hareketinin düzenli olduğunu gösterir. Şekil 4'e bakar mısın?

Bu fotoğraf, yaklaşık on saat süren pozlama ile çekilmiş. Çektiğin ya da gördüğün gece fotoğraflarında otomobil ışıklarının göründüğü gibi, yıldızlar da bu süre içinde takip ettikleri yolları gösteren birer çizgi bırakıyorlar fotoğrafa. (Bu yüzden, modern astronomi gözlemlerinde teleskop sabit durmaz, yıldızları takip eder.)

Gördüğün gibi, tüm yıldızlar dairesel hareket yapıyorlar; üstelik tüm daireler eşmerkezli. Bir ortak özellikleri daha var, görebilecek misin?

- *Hepsi yaklaşık yarım daire gibi galiba...*

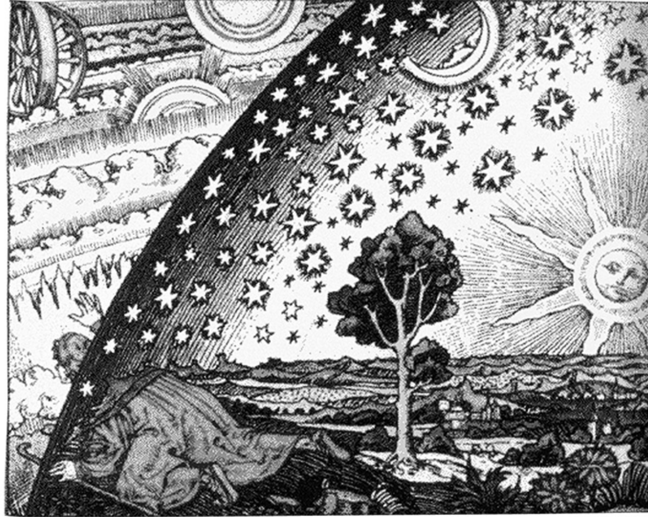
- Doğru... Bu da hepsinin aynı açısal hızla, bir başka deyişle aynı sürede bir tur tamamlayacağını gösteriyor. Sen bunu nasıl yorumlarsın?

- *Bahsettiğimiz gibi, Ay ve Güneş'in görünen hareketi dünyanın dönüşünden kaynaklandığına göre, yıldızlar için de aynı şey geçerli olabilir mi?*

- Öyle ise, dönme periyodu, yani bir turun süresi ne olmalı sence?

- *Dünyanın dönüş süresiyle aynı, yani 24 saat olmalı.*

- Dünyanın dönüş süresine eşit olduğu doğru, ancak tam hassas olmak gerekirse, bu süre yaklaşık 23 saat 56 dakikadır, neden 24 saat olmadığını ayrıca araştır istersen. Tabii ki eskiçağlardakilerin bu farkı ölçmelerine imkân yoktu.



Şekil 5. "Kâşif" gökkürenin ötesine bakıyor.

- *Peki ama, eskilerin saatlerce pozlandırabilecekleri fotoğraf makineleri olmadığına göre, bunları fark edebildiler mi?*

- Bir kere, eskiden elektrik olmadığı için günümüz astronomlarının “ışık kirliliği” dedikleri problem yoktu. Yani yer kaynaklı ışıklar havadaki tozlardan yansıyıp insanların gözüne gelerek yıldızların görülmesini zorlaştıran bulanık bir fon oluşturmuyordu. Ayrıca genel ışık seviyesinin düşük olması sayesinde, yeterince bekleyince gözbebeği daha fazla açılıp, daha fazla ışık toplayabiliyordu; elektrik ışıklarından uzak bölgelerde (ya da elektrik kesilince) yıldızların sanki daha parlak göründüklerini sen de fark etmişsindir. Yine elektrik olmayınca, günümüzde bizi geceleri oyalayan birçok şey de (televizyon seyretmek gibi) mümkün değildi, yani insanların -en azından bazılarının- daha fazla zamanları vardı. Son olarak, yön bulma, zaman tayin etme ve dinsel amaçlarla gökyüzünü özellikle inceleyen insanlar vardı. Ve yukarıda bahsettiğimiz üç özellik, yani yıldızların birbirleriyle tam bir uyum içinde hareket ettikleri fark edildi. Zaten bu uyum olmasa, takımyıldızlar olmazdı: Örneğin Büyük Ayı’daki altı parlak yıldızı düşün: Her biri kendi kafasına göre hareket etseydi, kepçe şekli kısa zamanda bozulurdu, değil mi?

Ancak, dünyayı durağan kabul ettikleri için, bu uyum, önemli bir problem oluşturuyordu: Nasıl olur da bu 6000 küsur cisim (iyi koşullarda çıplak gözle bu civarda yıldız görülebilir) birbirlerine göre konumlarını değiştirmeden hareket edebilir?

Ben, Amerikan yollarında birkaç defa motosiklet çeteleri gördüm. Bunlar, öndeki liderlerinin komutlarıyla hep birlikte şerit değiştiriyor, birlikte hızlanıp birlikte yavaşlıyor, kısacası tek bir araç gibi hareket ediyorlardı. Açıklama için bu bir model olabilir: Yani birbirleriyle kurdukları iletişim sayesinde uyum sağlayan bağımsız öğeler. Bir diğer modeli de çocukluğumda Anadolu’da yaptığım otobüs yolculuklarında gördüm: Geceleri, karanlıklar içinde ilerlerken bazen birlikte hareket eden ışıklar görürsünüz. Bunların da uyumlu hareket eden motosikletler olması mümkündür, ama yaklaşınca genellikle, meraklı bir kamyoncunun aracının çeşitli yerlerine fazladan ışıklar iliştirmiş olduğunu anlarsınız. Yani bu modelde gördüğünüz öğeler bağımsız değil, aslında tek bir öğe var.

Tabii ki bu ikinci model daha olası görünüyor; kabul edilen de bu oldu. Gökyüzü bir kubbeye benzediğinden (biz de “gök kubbe” demez miyiz?), dünyanın büyük bir küre ile çevrili olduğu, bu kürenin dünyadan geçen sabit bir eksen üzerinde döndüğü, yıldızların bu küre üzerine iliştirilmiş, yani küre üzerinde sabit olduğu kabul edildi. Zaten Hint-Avrupa dillerinde yıldız kelimesi sabit ile aynı kökten gelir: İngilizce “star”, Farsça “sitâre” ile bizde de bazen kullanılan “statik” kelimelerini düşün. Bu modelden esinlenmiş meşhur bir ortaçağ eserini Şekil 5’te görebilirsin.



Şekil 6. Yedi “gezegen”, küreleri ve gökküre.

- *Ama bu resimde dünya düz! Hani yuvarlak olduğunu biliyorlardı?*

- Haklısın. Belki de bu resmi yapan ortaçağ sanatçısı hâlâ dünyayı düz zannediyordu. Sonuçta ortaçağda yaygın eğitim diye bir şey yoktu. Ama belki de sanatçı, bilinenin ötesini merak mesajını iletebilmek için sanatsal özgürlüğünü kullanmıştır. Çünkü, kabul

edilen modeli resmetseydi, dünya ile gökküre arasında büyük bir boşluk olacak, “kâşif”, ötesine bakmak için gökküreye ulaşamayacak, ya da dikkat dağıtıcı bir binite (anka kuşu? ejderha?) binmesi gerekecekti. Ulaşsa bile, ya kâşifin ya da dünyanın çok küçük çizilmesi gerekecekti.

- *Baktığı şey de gökküreyi ekseni etrafında döndüren mekanizma anlaşılan... Peki, model yıldız hareketlerini açıklıyor, bu kadar mı?*

- Tabii ki bu kadar değil. Kendini bir ilkçağ, hatta daha da eski zaman insanının yerine koy. Dünyada her şey belirsiz. Yarın havanın nasıl olacağından, herhangi bir anda dağların arkasından bir yağma ordusunun çıkıp çıkmayacağından, kral ya da derebeyinin canınızı, çocuğunuzu ya da büyük ihtimalle olmayan malınızı almaya karar verip vermeyeceğinden emin değilsiniz. Büyük ölçüde emin olabildiğiniz şeyler, gök olayları. Sabah Güneş’in doğacağı, ayın doğuş-batış zamanları ve evreleri. Ve tabii yıldızların, dolayısıyla gökkürenin hareketi. Hepsi, algılayabildiğin kadarıyla, mükemmel bir düzen içerisinde işliyor. Hatta merkezdeki, dönmeyen gökcismine, yani kutup yıldızına bakarak kuzeyi, tanıdığın bir yıldızın göğün neresinde olduğuna bakarak geceleyin yaklaşık zamanı bilebilirsin.

Gökcisimlerine Tanrısallık atfedilmesine, Ay ya da Güneş tutulmaları, kuyrukluyıldız görünmesi gibi düzeni bozan olaylardan dehşete kapılınmasına şaşırmamak gerek. Bir de işin estetik tarafı var. Daire, en mükemmel geometrik şekil olarak kabul ediliyordu; eh, bu mükemmellik de Tanrısallığı çağrıştırıyor...

Ancak, gökcisimlerinin düzgün dairesel hareket yapması kuralının, ilk anda aynı hareketi yapıyormuş gibi görünmesine rağmen, dikkatli incelenince fark edilebilen yedi tane istisnası vardı. 6000 küsur içinde yedi. Dolayısıyla bunlar gökküreye sabitlenmiş olamazdı; gökkürenin önünde yavaşça “geziyorlardı”, bu yüzden yıldızlardan ayırt edilerek bunlara “gezegen” dendi. (Arapça “seyyare”, Yunanca “planet.”) Onlar için de birer küre düşünüldü ve onlara da Tanrısallık atfedildi. Bu gezegenler, Güneş, Ay, Mars, Merkür, Jüpiter, Venüs ve Satürn’dü.

- Hem gezegen diyor, hem de Güneş ve Ay’ı da sayıyorsunuz.

- “Gezegen”i “dünyadan bakıldığında yıldızlardan farklı hareket eder görünen gökcismi” olarak tanımlarsanız, Güneş ve Ay da

gezegen olur; bunlar tabii ki sonradan sınıf değiştirdiler. Sonuçta evren modeli, dünyayı çevreleyen iç içe sekiz küre haline geliyor.

İş bununla da bitmiyor. Tanrılarınız varsa onlardan yardım ister, onları kızdırmak istemezsiniz. Yani memnun etmek, onurlandırmak gerekir. Birini onurlandırmanın bir yolu da, bir şeylere ismini vermektir. Bu yedi gezegenin/Tanrının ismi de birer *güne* verilmiştir. Pazar günü Güneş'e (Örnek: İngilizce Sunday), pazartesi Ay'a (Örnek: İngilizce Monday), salı Mars'a (Örnek: Fransızca Mardi), çarşamba Merkür'e (Örnek: Fransızca Mercredi), perşembe Jüpiter'e (Örnek: Fransızca Jeudi), cuma Venüs'e (Örnek: Fransızca Vendredi), ve cumartesi Satürn'e (Örnek: İngilizce Saturday) adanmış.

- *Çok ilginç. Yani, bir haftanın yedi gün olması, çıplak gözle görülebilen yedi "gezegen", bir diğer deyişle beş gerçek gezegen olmasından kaynaklanıyor.*

- Bunun bir göstergesi de yedi günlük bir zaman biriminin tüm kültürlerde mevcut olması. Neden beş ya da on değil, örneğin? Her ne kadar biz şimdi gezegenlerin Yunan/Roma isimlerini kullanıyorsak da, gezegenler/Tanrılar ile günler arasındaki ilişki Eski Yunan'dan önce kurulmuş anlaşılan. Her kültürde bu isim ilişkisi yok, kimi kültürlerde bir gün özel, diğerleri numara ile anılıyor; ama yine de yedi gün ve gezegen/Tanrısallık ilişkisi başka şekillerde yaşıyor.

- *Bizdeki gün isimleri?*

- Bildiklerim, çarşamba ve perşembe Farsça'dan (cıhar=dört, şemb=gün, penc=beş) cuma da Arapça'dan (cem=toplama, cemaat=topluluk, cemiyet=toplum, cami=toplanılan yer, cuma=toplanılan gün) geliyor. Bu arada Venüs'ün, Arapça/Osmanlıca'sının Zühre olduğunu, Venüs'ün Eski Yunan'da Güzellik ve Aşk Tanrıçası olduğunu da hatırlatayım...

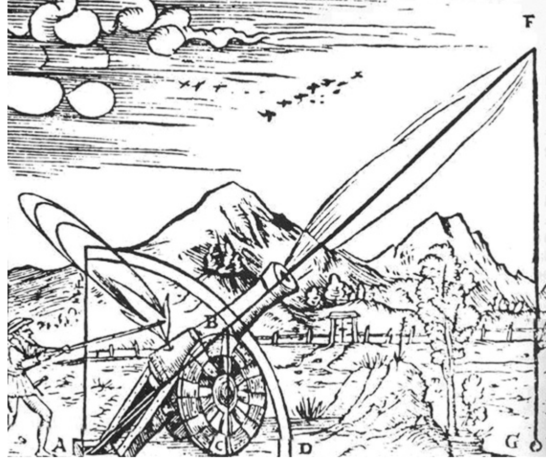
- *Eee? İslam kültüründe gezegenlere Tanrısallık atfedilmiş olamaz ki...*

- Doğru. Ama kültürler arasında ilginç etkileşimler olabiliyor. Yoksa neden "zührevi hastalıklar" densin?

Bir de şu var: Gezegenler Tanrı, ama hepsini kapsayan bir gökküre var. Dolayısıyla gökküre de Tanrıların bile bazen karşı duramadığı bir tür kader kavramıyla özdeşleştirilmiş. Genelde gezegenlerin

kürelerinin, özelde de çevreleyen kürenin İslam kültüründeki adı, sıkı dur... **felek.**

- *Demek başımıza gelen her kötü şey için suçladığımız felek... O zaman Şekil 5'teki mekanizma da "feleğin çarkı" oluyor... Peki beşinci element?*



Şekil 7. Ortaçağ fiziğine göre bir top mermisinin yolu. Mermi "itki"si bitene kadar düz gidip, sonra dik olarak düşüyor.

İlkçağ astronomisini konuşmaya başlarken söylediğimiz gibi, gökcisimleri beşinci elementten oluşmalıydılar. Malum film karakterinin neredeyse Tanrısal güçleri, gökcisimlerine, dolayısıyla beşinci elemente Tanrısallık atfedilmesiyle ilgili...

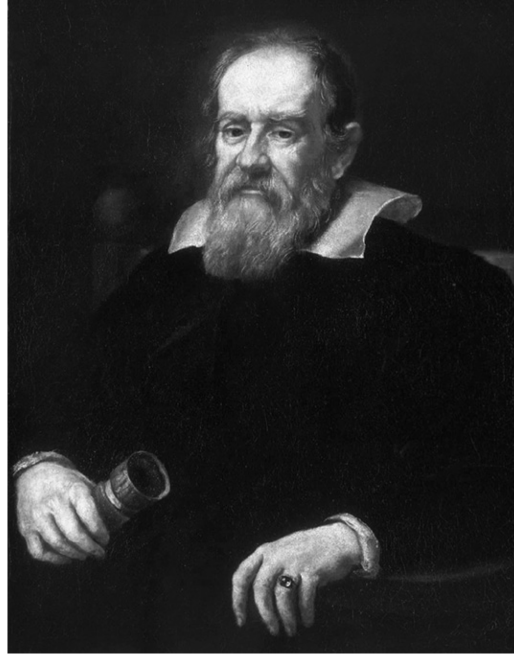
- *Yani filmin önkabulü tamamen yanlış bir kimya, yanlış bir astronomi ve ilişkili mitoloji... Ve biz bunu bilimkurgu niyetine seyrettik...*

- Film sınıflandırmasına giremeyeceğim... Neyse, görelilik öncesi durumu bir özetleyelim: İlkçağ (Aristoteles) fiziğine göre dünyada, üzerinde herhangi bir etki olmayan bir cismin doğal hali durağanlıktır; bir etken tarafından harekete geçirilmiş olsa bile bu etki ortadan kalkarsa cisim birazdan durur. Gökyüzünde ise, temel hareket düzgün daireseldir; durmaz, tekrarlar.

Dünyadaki cisimlerin nerede durmak “istediklerini”, dört elementten ne kadar içerdikleri belirliyor. Bu paradigmada fiziksel özellikleri kimya belirlediğinden, bir anlamda, bugünkünün aksine, kimya daha temel. Gökcisimleri ise, “mükemmel”ler, farklı yasalara uyuyorlar, dolayısıyla kimyaları da farklı olmalı: Onlar beşinci elementten yapılmış. Evren iç içe dünya merkezli kürelerden oluşuyor, Satürn’ün ötesinde bir yerde, en büyük küreyle, en büyük **felek** ile bitiyor...

- *İlkçağ filozoflarına bu kadar zaman harcadık, daha Galileo’ya 17 asır var; bu söyleşi bitmez...*

- İşin ilginci, bu asırlar boyunca bu konularda temel bir değişiklik -bir-iki filozofun çabalarına karşın- olmadı.



Şekil 8. Galileo Galilei (1564-1642).
Gerçek fiziğin kurucusu değilse de, başlatıcısı.

Eski Yunan'da astronomi daha da ayrıntılandı; gezegenlerin yıldızlara göre karmaşık hareketini ille de "mükemmel" dairelerle açıklamak için her gezegenin hareket dairesi üzerine başka bir daire bindirildi, sonra ilk dairenin merkezinin tam olarak dünya olmayabileceği düşünüldü. Bunlar Batlamyus (Ptolemeaos) tarafından 2. yüzyılda sistematik hale getirildi; Batlamyus, gözlemlerle uyum sağlayabilmek için, açısal hareketin merkeze değil, hafifçe farklı bir noktaya göre düzgün olması değişkenini ekledi. Daha sonra da Aristoteles/Batlamyus öğretisi, Hıristiyanlığın entegre bir parçası haline geldi. Kopernik'e kadar astronomların yaptıkları, Batlamyus'un dairelerinin çapları, hareket hızları, daire ve hareket merkezi farkları gibi parametrelerini öncekilerden daha iyi ölçmeye çalışmaktan ibaretti.

- *Genel kuram değişmez kabul edildikten sonra, bunları ölçmeye ne gerek vardı? Bu parametrelerin ne önemi vardı ki, ölçümü için bunca çaba gösterildi?*

- Gezegenleri göremiyorken de, örneğin hava bulutluyken ya da 20 yıl önce iki veya üç ay sonraki konumlarını hesaplamak için...

- *Ama neden? Bu konumların ne önemi var?*

- Fal bakmak için. Kral "müneccim"den (Arapça'da necm=yıldız) yapmayı düşündüğü bir şeyin olası sonuçları için öngörüler ister; müneccim gezegenlerin kralın doğduğu günkü ya da o işi yapmayı düşündüğü günkü konumlarını bilmek isteyecektir. Tabii bazı astronom/astrologlarda, modelin ne kadar doğru olduğuna yönelik bir merak da söz konusu.

- *Yani diyorsunuz ki astronomi verilerinin toplanması büyük ölçüde boş inançlar sayesinde mümkün oldu. Ne ilginç...*

- Evet. Hareket konusu da biraz daha netleşti; "impetus" (modern momentum kavramının öncülü) kavramı çıktı, hareketli nesnelerin impetusu bitene kadar düz hareket edip, sonra Aristoteles'in öngördüğü "doğal" harekete geçiş yapacağı düşünüldü. Bu yüzden bir ortaçağ filozofu, bir top mermisinin, ortaçağdan kalma bir resmi gösteren Şekil 7'deki gibi üçgensel bir yol izleyeceğini düşünebiliyordu.

- *Ama bu saçmalık! Göz var, mizan var! El insaf artık!*

- Evet. Maalesef Aristoteles geleneğinde deneyle ya da gözlemle karşılaştırma diye bir şey yok, her şeyin yalnız düşünce ile bulunabileceği yaklaşımı var; bu da onları bazı bariz hatalara götürmüş. Deney/gözlemin bu derece hor görülmesinin de Eski Yunan'daki sosyal düzenle ilgisi olabileceğini (yüzde 10 vatandaş, yüzde 90 köle) düşünüyorum ama, çizmeyi aşıp, sosyologların alanına girmeyeyim.

Aristoteles'in başka fizik hataları da var. Örneğin, ağır cisimlerin daha hızlı düşeceğini öngörmüş ki, bu zaten kendi içinde çelişkili.

- *Ne gibi?*

- Bir ve üç kiloluk iki cisim düşün. Şimdi bunları uzunca bir vidayla bağla. Bu sistemin üç kiloluk cismin tek başına düşeceğinden daha yavaş düşmesi beklenir, çünkü bir kiloluk olan daha yavaş düşmeye çalışıp, diğerini yavaşlatacaktır; yani sistem, örneğin iki kiloluk bir cisim gibi düşecektir. Öte yandan sistem, aynı zamanda dört kiloluk bir cisimdir, bu durumda üç kiloluk cismin tek başına düşeceğinden daha hızlı düşmesi beklenir!

- *Aristoteles tüm zamanların en önemli fikir adamlarından biri değil miydi?*

- Evet, felsefe, mantık, daha bir sürü konu, artı kendinden öncekilerin fikirlerini toparlaması bakımından çok önemli bir fikir adamı, ama fizik konusundaki düşünceleri rezalet. Ama onun büyük ağırlığı, daha da önemlisi temsil ettiği düşünce sistemi yüzünden, yüzyıllarca o rezalet fizik değişememiş. Bundan dolayı bazı bilim tarihçileri, Bilimsel Devrim'in, dolayısıyla Endüstri Devrimi'nin Aristoteles yüzünden 12-13 yüzyıl geciktiğini, onun (fiziğe) negatif etkisi olmasaydı, ortaçağın karanlık yüzyıllarının yaşanmayabileceğini söyler. Hatta bir fizikçinin zamanda geri gidip Aristoteles'i "doğru yola" yönlendirme denemesini anlatan bir bilimkurgu öyküsü ("Aristotle and the Gun", Sprague de Camp) bile vardır.

- *Başarılı oluyor mu?*

- Havalar da değişti değil mi, son günlerde?..

6- **Eylemsizlik ilkesi nedir? Görelilik ile ilgisi nedir?**

- *Peki bu "doğru yol" sonunda nasıl bulundu?*

- Zamanla Aristoteles/Batlamyus geleneğine yapılan ufak tefek itirazlar, Galileo ile olgunluğa ulaştı. Doğa yasalarına Aristoteles öğretisindeki gibi salt saf düşünce ile değil, deney/gözlem rehberliğinde ulaşılması gerektiği fikri daha önce El Heysem, El Birunî, İbni Sina, Roger Bacon gibi filozoflarca ileri sürülmüş, ancak çok etkili olamamıştı; Galileo da bu fikri benimsedi. Doğrudan Aristoteles fiziğinin merkezinde yer alan, üzerinde bir etki olmayan nesnelerin yavaşlayıp duracağı öğretisini hedef alan deney ve gözlemler yaptı ve bu öğretinin yanlış olduğuna karar verdi.

- *Nasıl?*

- Yerdeki bir kutuya tekme at. Aristoteles öğretisinin dediği gibi biraz gider ve durur. Ama ne kadar? Senin tekmenin şiddeti haricinde, zeminin ve kutunun altının özelliklerine de bağlı, değil mi? Diyelim ki zemin kaba tahta, kutu plastik olsun.

Şimdi zemini güzelce perdahla. Yeniden aynı şiddette tekmele. Daha uzun mesafe gider değil mi? Bir de kutunun altını cilala, yeniden tekmele. Daha da uzun gider. Altını yağla, yeniden tekmele. Dahaaaa da uzun gider. Tekerlek tak, yeniden tekmele. Çok daha uzun gider.

Sorun şu: Eğer sen aynı şiddette tekmeliyorsan, kutunun başlangıç "impetus"u her defasında aynı. Neden farklı mesafeler gidiyor? Aristoteles öğretisinde bunun net bir cevabı yok...

- *Sürtünme kuvveti...*

- Zaten Aristoteles öğretisinde kuvvet kavramı net değil ki... Galileo durmanın sebebinin sürtünme olduğunu kavradı ve sürtünmeyi yok edebilirsek ne olur sorusunun cevabını araştırdı. Kutu örneği benzeri deneyler/akıl yürütmeler sonucunda, **gerçekten** üzerine bir etki olmadığında, cismin **durmayacağı**, yani cismi durdurmak için bir kuvvet gerekeceği yargısına vardı. Bu ilkeye **eylemsizlik ilkesi** deniyor. Öneminden dolayı, vurgulayarak tekrar yazalım:

-

Tabii ki üzerinde herhangi bir etki olmaması durumunu deneysel olarak gerçekleştirmek kolay değil. Bir yol, sürtünmeyi başka bir kuvvetle dengelemek. Zaten -her ne kadar Galileo zamanında nitel analizi henüz yapılamamış olsa da- dünya üzerinde hiçbir zaman kaçınamadığımız yerçekimi kuvveti var, ama onu zeminin bize uyguladığı (fizik dersi gören öğrencilerin, yüzeye dik olmasından dolayı normal kuvvet diye bildiği) kuvvetle dengeliyoruz. Ama sanırım senin gördüğün sürtünmenin sıfır olması durumuna en yakın şey, bazı eğlence yerlerinde görmüş ya da oynamış olduğunu tahmin ettiğim, bazen havatopu denen oyunun diskleri.

- *Hani şu bir masa üzerinde oynanan, iki oyuncunun birer plastik diski ütü yapar gibi tutup, top niyetine daha küçük bir diske vurarak birbirlerinin kalelerine gol atmaya çalıştığı oyun mu?*

- Evet. Bu oyunu oynadığın zaman, gerek "oyuncu" disklerinde, gerek "top" disklerinde herhangi bir sürtünme hissediyor musun?

- *Hayır. Yağ gibi kayıyorlar...*

- Diyelim ki masa uzun olsa, 100 m ya da bir km; iyi bir vuruşla "top" ne kadar gider?

- *Bence 100 m'yi rahat geçer...*

- İşte bu, sürtünmenin büyük ölçüde yok edildiği bir örnek. Eylemsizlik ilkesi diyor ki, tamamen yok edilebilse, sonsuza kadar giderdi.

- *Burada sürtünme nasıl yok ediliyor? Diskler yağlı değil...*

- Masa zemininde bol miktarda incecik delik var ve bir pompa yardımıyla bunlardan hava üfleniyor. Dolayısıyla disklerle masanın arasında her zaman incecik bir hava tabakası var. Hava da bir gaz olduğundan çok mükemmel bir yağ vazifesi görüyor.

- *O yüzden havatopu deniyor herhalde. Yine de yüzlerce, hatta binlerce metreden sonsuza atlamak bana fazla iddialı geliyor...*

- İlke olarak haklısın. Ama eylemsizlik ilkesinin başka sonuçları da var. Eğer üzerinde herhangi bir etki olmayan cisim, hangi hızda olursa olsun, hızını ve yönünü değiştirmiyorsa, **her hız, aynı derecede doğaldır.** Şimdi, cismin yanında, aynı sabit hız ve yönde giden bir gözlemci düşün. Bu gözlemci, cismi durağan olarak görecektir. Durağan bir cismin, üzerinde bir etki olmadıkça durağan kalmaya devam etmesinden daha doğal bir şey olamayacağına göre,

tüm (birbirine göre sabit vektörel hızla giden) **gözlemciler de aynı derecede doğaldır**.

- *Görelilikle ilgi burada kuruluyor galiba.*

- Evet, eylemsizlik ilkesinin görelilik özelliği var. Galileo, zamanında uçak olmadığı için (bkz. Soru 2 yanıtının başları), gemi örneği verir: Bir geminin kapalı bir kamarasındaysanız, gemi limanda duruyor mu, yoksa sakin bir denizde sabit hızla ilerliyor mu, ayırt edemezsiniz. Bir diğer gemi örneği: Direğin tepesinden kopan bir çivi, (hava, yani rüzgâr etkisi ihmal edilebilirse) gemi hangi yöne ve hangi hızla giderse gitsin, bu hız ve yön sabit olduğu müddetçe, direğin dibine düşer.

- *Bunda şaşırtıcı olan ne?*

Aristotelesçiler, çivinin, koptuğu anda gemiden ayrılmış olacağından, geride kalacağını düşünürlerdi. Halbuki eylemsizlik ilkesine göre, çivi direğin tepesindeyken gemiyle aynı hıza sahipti, **düşerken bu hızı yatayda korur**. Dolayısıyla düştüğü süre içinde -bu bir saniye mi olur, üç mü fark etmez- gemi ne kadar yol kat ettiyse çivi de yatayda o kadar yol kat eder ve böylece direğin dibine düşer. Ve bu, olay durağan gemide cereyan etse olacak olan olayla aynı şeydir.

Sonuçta, eylemsizlik ilkesi, bazı mekanik deneylerinin sonucunun gözlemcinin hareketinden bağımsız olmasını gerektirir ve bu yüzden sınamak için bir kutuyu tekmeleyip, duracak mı durmayacak mı diye sonsuza kadar beklemek gerekmez; belli deneyler için bir gözlemcinin bulduğu sonucu, ona göre sabit hızla hareket eden başka bir gözlemcinin bulduğu sonuçla karşılaştırmak yeterlidir.

7-**Görelilik ile Güneş-merkezliliğin ilgisi nedir?**

- *Aristoteles'de gök mekaniği zaten farklıydı...*

Galileo bu konuda da Aristoteles öğretisini sorguladı. Zaten bir müddet önce Kopernik, Güneş-merkezli bir sistem önermişti.

- *Yermerkezlilikten Güneş-merkezliliğe geçiş bu kadar basit mi? "Günün birinde Kopernik adında bir adam Güneş-merkezli bir model önerdi..."*

- Tabii ki bu kadar basit değil, güneşin altında gerçekten yeni çok az şey vardır. Dünya'nın değil de Güneş'in merkez olabileceği fikri MÖ 4. yüzyıla kadar gider, Kopernik'e gelene kadar her birkaç nesilde bir Güneş-merkezliliği savunan, en azından bahseden bir filozof bulunur; bunların en bilineni, MÖ 3. yüzyılda yaşayan Aristarkus'tur.

- *O nasıl bu sonuca ulaşmış?*

- Ay'daki gece/gündüz çizgisinin eğriliğini inceleyerek, Güneş'in çapının dünyadan (en az) yedi kat büyük olduğu sonucuna vardı...

- *Gerçek rakam 100 küsur değil mi?*

- 109. Ancak Aristarkus'un sonucu nitel olarak, yani Güneş'in Dünya'dan büyük olması bakımından doğru. Gerçekten bu kadar uzak bir sınır bulması ise, denediği ölçümün insan gözünün sınırlarının ötesinde olmasından kaynaklanıyor. Her neyse, şöyle düşündü herhalde: "Eğer Güneş bu kadar büyükse, merkez o olmalı."

- *Peki niye Aristarkus meşhur değil?*

- Pek kimseyi inandıramamış da ondan. Şöyle ki: Eğer Dünya'nın Güneş etrafında döndüğünü varsayarsan, gece-gündüzü açıklamak için kendi ekseni etrafında da döndüğünü varsaymak zorundasın. Dünyanın yarıçapı da aşağı yukarı bilindiği için, bu hızı hesaplamak da çok basit, Yunanistan ya da Türkiye'nin enleminde -ikinci sorunun başında da bahsettiğimiz gibi- yaklaşık saatte 1300 km çıkıyor; yani saniyede 350 metre! Böyle korkunç bir hızın farkında olmamak, insanlara akıl almaz geliyordu. Dediler ki, "Şöyle bir zıplasam, havada bir saniye kalsam, ayağımın altında yer 350 metre kaymalı. Ama ben aynı yere düşüyorum!" ya da, "Dünya bu hızla dönüyorsa, havadaki kuşlar, hatta havanın kendisi neden geri kalmıyor?" ya da "Dünya, Güneş etrafında dolanırken Ay onu nasıl takip edebilir?" Aristarkus ve diğerleri, bu soruları doyurucu şekilde cevaplayamadılar.

- *Kopernik nasıl cevapladı?*

- Bu soruları Kopernik de cevaplayamadı aslında. Birazdan bahsedeceğimiz gibi, Galileo cevapladı. Kopernik bu tercihi, Batlamyus'un dairesel hareketin düzgünlüğünden vazgeçmesini

(daha doğrusu düzgünlük merkezini dairenin merkezinden almasını) onaylamadığı için yapmıştır. Ancak, Güneş-merkezli bir model o zamanlar Hıristiyanlığa karşı kabul edildiğinden, Kopernik kitabını ancak ölüm döşeğindeyken yayımlamaya cesaret etmiştir.

- *Peki Aristarkus'un görüşleri ve benzerleri kabul görmediği halde, Kopernik'inkiler neden kabul gördü?*

- Bir kere, çok iddialı sunulmadı. Kopernik'in kendisinin ne düşündüğü çok net değil ama, en azından bir süre için, kullananların tutumu "Canım, hesap için matematiksel bir yöntem işte; ama arkasındaki modeli o kadar da ciddiye almaya gerek yok" şeklindeydi; o yüzden önceleri fazla tepki görmeden yaygınlaştı. İkincisi, bu sistemin destekçilerinin hazırladığı astronomik/astrolojik tablolar, gerçeğe 200 yıl kadar önce hazırlanan eski sistem tablolarından daha yakındı, bu yavaş yavaş altındaki modele güven sağladı.

Kopernik'in modeli aslında Batlamyus'unkinden daha doğru sonuçlar veriyor değildi; daha basit de değildi.[6] Kopernik de gezegenlerin Güneş etrafındaki yörünge dairesine bir daire daha bindirmek, sonra da ilk dairelerin merkezlerini Güneş'ten başka yerlere almak zorunda kalmıştı. Tabloların daha doğru sonuçlar vermesi aslında daha güncel gözlemlerden başlanarak hesap yapıldığı içindi. Ancak farklı bir düzgün açısal hareket merkezi kullanmaması ve gezegenlerin yörünge periyotlarının Güneş'ten uzaklık ile düzgün bir şekilde artması, modele "estetik bakımdan" üstünlük sağlıyordu.

6) Bazı kaynaklarda (özellikle bazı astronomiye giriş kitaplarında), Kopernik modelinin Batlamyus modelinden daha basit olduğu, Batlamyus modelinde defalarca daire üzerine daire üzerine daire... bindirildiği, sonuçta Batlamyus modelinde 80 civarında, Kopernik modelinde 40 civarında daire olduğu yazar. Bu doğru değildir.

Batlamyus sisteminde hiçbir zaman bir gezegenin hareketi ikiden fazla daire ile betimlenmemiştir. Ancak Batlamyus, gezegenlere hareketi mekanik olarak aktaran bir model de yapmış, bu modelde dişli ya da kayış görevi gören küreler kullanmıştır, ki bunların toplam sayısı -nasıl saydığınıza bağlı olarak hafif değişmekle beraber- 40 civarındadır. Kopernik'in benzer modelinde biraz daha fazla küre vardır! Bu yanlış bilginin nasıl yayıldığı, şimdi bilim tarihinin görece az önemli, cevaplanmamış sorularından biridir.

Yine de modelin en önemli şansı belki de, Galileo, Kepler ve Newton'la takip edilmesiydi. Arkadan onlar gelmeseydi, belki Kopernik modeli de "bilim tarihinin tozlu sayfalarına" terk edilecekti...

- *Galileo’nun katkısı ne bu konuda?*

- Çok. Galileo, Güneş-merkezli modeli **arkasındaki fikirlerle birlikte** destekleyip, itirazları da inandırıcı olarak cevapladı. Bu da Galileo’nun eylemsizlik ilkesi sayesinde oldu. Yani, havaya zıplama itirazında, saatte 1300 km hızla dönen dünyanın hızına sen de sahipsin ve eylemsizlik ilkesi uyarınca **yatayda bu hızı korursun**, yani zıplama süresince dünya ile aynı yatay mesafeyi gidersin, dolayısıyla dünyanın zıpladığın noktasına inersin. Tabii ki bu, dünyanın hızının olmamasıyla aynı sonuçtur, yani ortak bir sabit hızın varlığı ile yokluğu ayırt edilemez...

- *Yani bir bakıma, dünyanın dönmesi ve bizim yerel gözlemlerle bunun farkında olmamamız görelilik ile açıklanıyor.*

- Genelde eylemsizlik ilkesi ile açıklanıyor denir, ama böyle bakmak da kesinlikle mümkün. Görelilik ile eylemsizlik arasındaki bağlantıyı zaten bir önceki soruda konuşmuştuk...

- *Aynı şey kuşlar, hava ve Ay için de geçerli herhalde...*

- Galileo’nun katkısı bu kadarla da kalmadı. Bir gün, Hollanda’da **teleskop** diye, uzaktaki nesnelerin görüntüsünü büyüten bir cihaz icat edildiğini duydu ve kendisi de bir tane yaptı. Galileo’nun teleskopu gökyüzüne çevirmesiyle, Aristoteles/Batlamyus öğretisinin evren modelinin temel direkleri birer birer devrildi:

Çıplak gözle görülemeyen yıldızlar gördü. Bu, ona tüm yıldızların aynı mesafede olmayabileceklerini, yani gökkürenin **derinliği** olabileceğini, sonuç olarak evrenin düşünülenden çok daha büyük olabileceğini söyledi. Tanrısal mükemmellikte küreler olarak düşünülen Ay ve Güneş’in böyle olmadığını; ayda çatlaklar, kraterler, dağlar, denizlere benzer yapılar, Güneş’te lekeler olduğunu gördü; hatta Güneş’e fazla bakmaktan, hayatının son dört yılını kör olarak geçirdi. Ve son olarak, Ay itirazını tamamen geçersiz hale getiren bir şey keşfetti: Jüpiter’in dört tane uydusu olduğunu.

Sonuçta Jüpiter’in durağan olduğunu iddia eden kimse yok; Batlamyus modelinde de Jüpiter hareket ediyor, Kopernik modelinde de. Hareketli Jüpiter’i bir değil, dört uydu takip edebiliyorsa, Güneş etrafında dolaşan dünyayı Ay neden takip edemesin? Bu gözlem, eylemsizlik ilkesinin açık bir gösterimini oluşturuyor; aynı zamanda

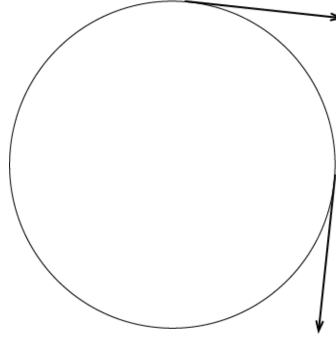
göreliliğin de. Bir gezegenin hareketli olmasının bir önemi yok, durağanmış gibi etrafında bir, hatta dört uydu dolaşabiliyor...

- *Peki, “Gene de dönüyor” olayı?*

- Güneş-merkezlilik, Aristoteles/Batlamyus öğretisini entegre eden Hıristiyanlık ile çelişki halindeydi. Bu yüzden kilise, Galileo’nun Güneş-merkezliliği savunmasını yasakladı ve engizisyon tehdidiyle öğretilerini, özellikle dünyanın döndüğünü inkâr etmeye zorladı ve ev hapsine mahkûm etti. Diz çöktürülen Galileo’nun, ayağa kalkarken “Gene de dönüyor” dediği rivayet edilir. Vatikan, Galileo’nun itibarını ancak 1992’de tam olarak iade etmiştir.

- *Özetlersek?*

- Eylemsizlik ilkesi ve bunun getirdiği görelilik, Güneş-merkezliliği kabul edilebilir hale getirmiştir.



Şekil 10. Düzgün dairesel hareket yapan bir cismin yörüngesi ve yörüngenin iki noktasındaki vektörel hızı. Bu iki vektörel hız aynı değil, yani bu iki nokta arasında vektörel hız değişmiş. Dolayısıyla hızının büyüklüğü aynı kalmasına rağmen, cismin ivmesi var. Bu ivmenin merkeze doğru olduğu gösterilebilir.

3. Bölüm - GALİLEO GÖRELİLİĞİ

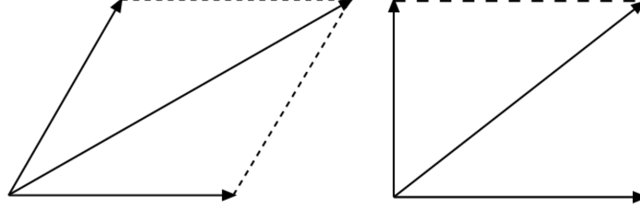
8- Newton'un hareket yasaları nedir? Veba salgını sayesinde bulundukları doğru mudur?

- *Eylemsizlik ilkesi, üzerinde herhangi bir etki olmayan nesnelerle ilgili. Zaten yerine geçtiği Aristoteles hükmü de öyleydi. Peki üzerinde etki olan nesneler?*

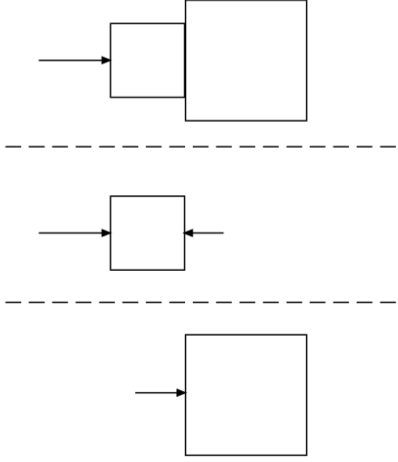
- Tabii ki bu konuyu düşünmek için önce üzerinde etki olmayan nesneleri anlamak gerekiyordu. Bunu eylemsizlik ilkesi sağladı. Sonraki soru ise, "etki"yle tam olarak ne kastedildiğiydi.

Eylemsizlik ilkesi, söz konusu nesnenin **vektörel hız**ının sabit olduğu şeklinde de ifade edilebilir. Bunu değiştirecek **etki**ye "kuvvet" adını verirsek, eylemsizlik ilkesi, "Kuvvet sıfır ise vektörel hız sabittir" diye de ifade edilebilir. O zaman da sorumuz "Kuvvet sıfır değilse, hız nasıl değişir?" haline gelir.

Bu durumda kuvvetin özelliklerini ve hız değişimi kavramını anlamak gerekir. Örneğin belli bir kuvvet, belli bir yayın, belli miktarda gerilmesiyle elde edilebilir. Çeşitli deneylerle kuvvetlerin **vektörel** olarak toplanabileceğini bulabiliriz. Örneğin, birbiriyle 60° açı yapan iki eşit kuvvet, ikisinin tam ortası yönünde ve her birinin -misli bir kuvvete; birbirine dik 3 ve 4 birimlik iki kuvvet, 4 birimliğe 37° açı yapan 5 birimlik bir kuvvete eşdeğerdir.



Şekil 9. İki kuvvet, her zaman tek bir başka kuvvete eşdeğerdir.



Şekil 11. Biri itilen ve diğerini iten iki cisim. Newton'un üçüncü yasasını anlamak için.

Gelelim hız değişimine... Bunu nicel olarak nasıl ifade etmeli ki, kuvvet ile bu değişimi birbirine bağlayan bir yasayı ifade edebilelim? Ama bir dakika... Hız nedir ki zaten?

- *Hız işte...*
- Öyle, değil mi? Günlük hayatımızda bize o derece doğal geliyor ki, ne olduğunu düşünmüyoruz bile... Evet, nedir hız? Ne durumda, bir nesnenin hızı vardır deriz?
- *Bir yerde durmuyorsa...*
- Yani nesi değişiyorsa?

- *Yeri... yani... konumu galiba...*

- Aynen öyle. Ama bu değişimin yönü de olabilir. Yerinden güneye de gidebilirsin, batıya da, yukarı da. Yani hızı bir ok ile gösterebilirsin, okun uzunluğu bize hızın büyüklüğünü, okun yönü de bize hızın yönünü söyler.

- *Yani hız, matematiksel olarak bir vektör.*

- Doğru. O yüzden, hızın yalnızca büyüklüğünü değil, yönünü de birlikte kastettiğimizi kendimize ve karşımızdakine hatırlatmak için **vektörel hız** terimini kullanırız.[7] Hız nedir sorusuna dönersek... Hızı olan nesnenin konumu değişiyordu, değil mi? Peki bu değişim çabuklaşırsa, hız büyür mü, küçülür mü?

7) İngilizce ders kitaplarında hız vektörü için *velocity*, salt büyüklüğü için *speed* terimleri kullanılır, ancak bu kelimeler günlük hayatta eşanlamlı olarak kullanılmaktadır. Bizde de benzer şekilde *hız* ve *sürat* kelimelerini kullananlar vardır. Ancak, bu uygulama, üniversitelerin ilk sınıflarından öteye pek geçememiştir.

- *Büyür tabii...*

- Dolayısıyla hız dediğimiz şey, konumun değişme hızıdır...

- *Hız, hızdır... Biraz döngüsel olmadı mı?*

- Maalesef kelimeler öyle denk geliyor, ama problem yok. Zamanla değişebilecek herhangi bir fiziksel büyüklük için, zamanla değişme hızı[8] tanımlanabilir. Bu büyüklük konum olunca, elde edilen büyüklüğe de hız diyoruz; ama başka bir şey diyebiliriz, örneğin sürat. Yani hızın bir dar, bir de geniş anlamı var...

8) Lise son ve üstü öğrenciler için: Zamana göre türev.

Hız değişiminin ihtiyacımız olan nicel ölçüsü de bu şekilde tanımlanır; yani (vektörel) hızın değişme hızı. Buna **ivme** diyoruz. Yani hızı çabuk değişen bir nesnenin ivmesi yüksektir.

- *Örneğin spor arabaların ivmeleri, sıradan arabalara göre yüksektir, değil mi?*

- Tabii. Otomobil literatüründe ivme sıfır hızdan 100 km/saat hıza çıkış süresi verilerek dolaylı olarak ifade edilir. Doğal olarak, bu süre ne kadar kısaysa, ivme de o kadar yüksektir. Sıradan otomobiller için bu süre 2010 yılı için 12 s civarındadır, spor otomobiller için 9-10 s ve altı, üst düzey Porsche'ler ya da Ferrari'ler gibi süper spor otomobiller içinse 4 s civarındadır.[9] Ancak, ivme her zaman hızlanma anlamına gelmez.

9) İvme kavramını görmüş öğrenciler için: Bu rakamların sırasıyla 2,3, 2,9 ve 6,9 m/s^2 *ortalama* ivmeye karşılık geldiğini hesaplayabilirsiniz.

- *Nasıl yani?*

Çünkü ivme derken **vektörel** hızın değişme hızını kastediyoruz. Şekil 10'a bak.

Bu şekil, düzgün dairesel hareket yapan bir cismin yörüngesini ve yörüngenin iki noktasındaki vektörel hızını gösteriyor. Bu iki vektörel hız aynı değil, yani bu iki nokta arasında vektörel hız değişmiş. Dolayısıyla hızının büyüklüğü aynı kalmasına rağmen, cismin ivmesi var. İki noktayı birbirine yakın alırsak, bu ivmenin merkeze doğru olduğunu gösterebiliriz.

Eylemsizlik ilkesinin ötesine geçebilmek için, kuvvet ile hız değişiminin arasındaki ilişkiyi araştırıyorduk. Newton, akıl yürütmeler ve yaptığı deneylerle bu ilişkinin, olabilecek en basit ilişki olduğunu buldu: Kuvvet, ivmeyle orantılı. Yani,

-

- *Neden ikinci? Birinci yasa ne?*

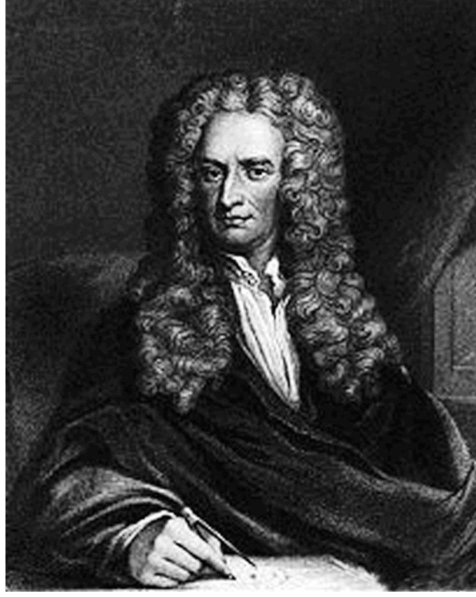
- Onu az sonra söyleyeceğim. İkinci yasayı matematiksel olarak - şeklinde ifade ediyoruz, burada *m*, cismin kütlesini gösteriyor. Yasa son derece doğal; sonuçta bir bowling topunu ivmelendirmek, yani hızını değiştirmek, aynı şeyi bir pinpon topuna yapmaktan daha zordur... Ancak, bir sorunumuz var: Bu yasa hangi nesneler için geçerli?

- *Ne gibi? Tüm cisimler için geçerli olmalı, değil mi?*

- İki parçadan oluşan bir cisim düşün. Bir yasanın, cismin iki parçası için ayrı ayrı geçerli olması, bütünü için geçerli olmasını gerektirmez her zaman...

- *Bir örnek verir misiniz?*

- Büyük, nötr ve iletken bir düzleme, küçük ve yüklü bir A küresi yaklaştırılırsa, düzlem küreyi çeker. Aynı şey bir B küresi için de geçerli olsun. A ve B kürelerini bir araya getirirseniz, oluşan cisme etki edecek çekim kuvvetinin, tek tek kürelere etki eden kuvvetlerin toplamı olacağı garanti değildir, hatta çekilmeyebilir bile.



Şekil 12.
Isaac Newton
(1643-1727), gerçek fiziğin kurucusu. Veba salgını yüzünden köyünde geçirdiği iki yılın (1665-67) kişinin üretkenliği bakımından benzerini düşünce tarihinde bulmak neredeyse olanaksızdır, ancak Einstein'ın mucize yılı ("annus mirabilis") olarak nitelendirilen 1905 yılı bununla karşılaştırılabilir.

- *Kürelerin biri pozitif, biri negatif yüklüyse bu olur, değil mi?*
- Doğru. Yüklerin büyüklükleri eşit olursa da, birbirini nötralize edeceğinden, küreler düzleme çekilmez. -'-
ya dönersek, örneğin bir otomobilin tekerlekleri, koltukları vs. için bunun geçerli olması, otomatik olarak otomobilin bütünü için de geçerli olması anlamına gelmez, ama ben de otomobilin bütününe uygulayabilmek istiyorum; nereye kadar böleceğim ki zaten? Tekerlekler de jant ve lastikten oluşuyor. Jantın bijonları, lastiğin içinde çelik teller var. Atomlara kadar mı ineceğim? Anlamı yok, o kadar denklemin içinden çıkılmaz...
- *Peki ne yapacağız?*
- Bir yasaya daha gerek var... Şekil 11'deki gibi, bir kuvvet tarafından itilen iki cismi düşün.

Burada *F*, yalnızca birinci cisme etki ediyor; ikinciyi ivmelendiren bir kuvvet olması gerek. Buna F_2 diyelim. Birinci cisim ise, *F*'nin yalnızca ona etki etmesinden daha yavaş ivmelenecektir, dolayısıyla *F*'ye zıt bir kuvvet olmalıdır. Buna da F_1 diyelim. Kolayca gösterilebilir ki[10] bu cisimlere -'yı istersem teker teker, istersem birlikte uygulayabilmemin şartı F_1=F_2'dir, yani birincinin ikinciye uyguladığı kuvvetin tam zıddını, ikinci birinciye uygulamalıdır. Üçüncü yasa, bunun tüm cisimler için geçerli olduğunu söyler:

10) -'yı iki cismi tek olarak kabul edip uygularsam, - elde ederim; -'yı iki cisme teker teker uygularsam elde edeceğim denklemler - ve -'dır. Son iki denklemden aldığım - ve - çarpımlarını ilk denkleme koyarsam, - bulurum, yani -.

-

Duvara bir yumruk at. Duvara bir kuvvet etki ettirirsin, değil mi? Peki, elin acır mı?

- *Acır tabii...*

- Demek ki duvar da senin eline bir kuvvet etki ettirdi... İşte üçüncü yasanın bir uygulaması...

- *Bu bana bir şey hatırlattı. "Son Kahraman" adlı filmde, bir aksiyon filmi karakteri, sihirli bir kart sayesinde sinema ekranından gerçek dünyaya geçer. Bir noktada otomobile ihtiyacı olur, düz kontak yapıp çalıştırmak için yumruğuyla park halindeki bir otomobilin camını kırar. Ve elinin acımasına çok şaşırır!*

- Evet, sinema perdesinde fizik kuralları pek de geçerli değildir... Her neyse, Şekil 11 için kullandığımızdan azıcık daha karmaşık bir matematiksel işlemle üçüncü yasa sayesinde ikinci yasayı, yani -'yı istediğimiz cisimler grubuna (sisteme) uygulayabileceğimiz kolayca gösterilebilir. Yani **üçüncü yasa, ikinci yasanın genel uygulanabilirlik (tutarlılık) şartıdır.**



Şekil 13. Isaac Newton evrensel çekim yasasını buluyor. Ay ve elma!

- *Hâlâ birinciyi açıklamadınız...*

- Birinci yasa da eylemsizlik ilkesi—

- *İyi de, o zaten ikinci yasanın bir özel hali değil mi? Hem zaten onu Galileo bulmadı mı?*

- Evet, çok titiz olmak istersek, ikinci yasa varken birinciye gerek yok; ikinci onu, ivme=0 hali olarak kapsıyor. Herhalde Aristoteles fiziğinden farkı vurgulamak için böyle adlandırdılar.

- *Galileo'ya haksızlık değil mi?*

- Bu yasalar, birlikte bir sistem oluştururlar. Her türlü hareket (örneğin çok çeşitli makinelerin işleyişleri), hatta hareketsizlik (örneğin binaların statik hesapları vs.), temelde bu iki yasa ile anlaşılabilir. Birazdan bahsedeceğimiz genelçekim yasası ile beraber kullanılınca, tüm gezegenlerin, uyduların, uzay araçlarının, hatta yıldızların ve gökadaların (galaksilerin) hareketleri anlaşılabilir. Ayrıca daha sonra bu yasalar neredeyse sonsuz sayıda moleküle istatistik olarak uygulanınca, ideal gazların davranışları da anlaşıldı ve buradan da termodinamik bilimi gelişti. Bu bilimin ürünleri de buhar makinesi ile başlar -yani Endüstri Devrimi'nin öncülü Newton yasalarıdır-, içten yanmalı motorlar ve klimalara kadar uzanır.

Bu çok geniş bir kapsam; 20. yüzyıl öncesi fiziğinin yarıdan fazlasını üç satırda özetliyor; günümüzde de -çok özel durumlar

hariç- mikrometreden büyük ve ışık hızının yüzde birinden yavaş cisim ya da sistemler için (örneğin, makine mühendisliğinin tamamı) geçerli. Bu yüzden korkunç önemli ve bu yüzden kapsayıcı bir isme ihtiyaç var, o da Newton olmuş. Sonuçta bir futbol maçındaki golde de üç-dört oyuncunun katkısı olabilir, ama gol son vuruşu yapanın hanesine yazılıyor...[11]

11) Ancak Newton "Uzakları görebildiysem, devlerin omzunda durmam sayesindedir" de demiştir.

- *Newton'un keşiflerini veba salgını sayesinde yaptığını duymuştum; bu doğru mu?*

- Newton, Cambridge'de genç bir öğrenciyken büyük bir veba salgını başladı. O zamanlar vebanın nasıl bulaştığı bilinmediğinden, alınan tedbir, insanları mümkün olduğu kadar birbirinden uzaklaştırmaktı. Bu yüzden Londra'da okullar da tatil edildi; iki yıl kadar...

- *Bizim de İstanbul'a iki santim kar yağınca tatil yaptığımızı düşününce...*

- Ve Newton köyüne, Woolsthorpe'a döndü. Ancak ailesi yerel ölçeğe göre zengin olduğu için köy işlerinde çalışması gerekmiyordu; bu süre boyunca düşünecek bol bol zamanı oldu. İşte adıyla anılan hareket yasalarını, birazdan konuşacağımız genelçekim yasasını, hatta bunları birleştirip gezegenlere uygulamak için gerekli matematiği bu sırada geliştirdi. İnsanlık düşünce tarihinde bir kişinin bu kadar üretken olduğu bir başka zaman dilimi bulmak neredeyse olanaksızdır, ancak Einstein'ın **mucize yılı** ("annus mirabilis") olarak nitelendirilen 1905 yılı bununla karşılaştırılabilir...

- *Ne diyeyim, saygıyla eğiliyorum...*

- Az önceki sorunla ilgili olarak, Newton yasalarının veba salgını **sayesinde** bulunup bulunmadıkları bilinemez, ama veba salgını sırasında bulundukları doğrudur.

9- Newton'un genelçekim yasası nedir? Felsefi/kültürel önemi nedir?

- *Genelçekim konuşacaktık...*

- Yerçekimi konusunda Aristoteles'in düşüncelerini hatırlıyorsun, değil mi? Galileo, bu konuyu da sorguladı—

- Bu Galileo da Aristoteles'e takmış galiba...

- Ve yaptığı çeşitli deneyler sonucunda hava direnci ihmal edilebildiğinde tüm cisimlerin aynı şekilde düştüklerini buldu. Bu arada, Aristoteles öğretisinin 5. Soru'nun sonlarına doğru bahsettiğimiz çelişkisi de söz konusu tabii. Yaşadığı Pisa'nın eğri kulesinden cisimleri düşmeye bırakıp incelediği rivayet edilir, ama bu çok olası görünmüyor.

- Neden?

- Serbest düşme epey hızlı olabilir. O zamanda bu süreleri ölçebilecek hassaslıkta saatler yoktu. Galileo, eğik düzlemdeki hareketin, serbest düşmenin yavaşlamış hali olduğunu kavrayıp, konuyu bu yöntemle inceledi ve serbest düşmenin yalnızca tüm cisimler için aynı olmayıp, ivmesinin de sabit olduğunu buldu.

- Bizim g diye bildiğimiz şey, değil mi?

- Evet, öyle. Newton, hareket yasalarını geliştirdikten sonra, Ay ile Dünya arasında bir kuvvet olması gerektiğini anladı. Çünkü, Şekil 10 ile ilgili olarak bahsettiğimiz gibi, dairesel harekette merkeze yönelik bir ivme söz konusudur ve Newton'un ikinci yasasına göre, bir ivme ancak bir kuvvet tarafından oluşturulur. Bir elma ağacının altında oturmuş, bu kuvvet üzerine düşünürken, düşen bir elmayı fark etti. (Elmanın tam olarak nereye düştüğü konusunda rivayet muhtelif! -) Elma da dünyaya doğru ivmeleniyordu, Ay da!

- Acaba ikisini de ivmelendiren aynı kuvvet olabilir miydi?

- Düzgün dairesel hareket yapan herhangi bir cismin ivmesi, duymuş olabileceğin v^2/r formülüyle kolayca hesaplanabilir. Ay için bu ivme, yaklaşık olarak g'nin 3600'de biri kadar çıkar. Newton, Ay yörüngesinin yarıçapının Dünya'nın yarıçapının yaklaşık 60 katı olduğunu da biliyordu. Eğer iki ivme de aynı kuvvet tarafından oluşturuluyorsa, mesafe artınca ivme, artma çarpanının karesi kadar bir bölen ile azalıyor görünüyordu. Ayrıca düşme ivmesi kütleden bağımsız olduğuna göre, düşen cisme etki eden çekim kuvveti, çekilen cismin kütlesi ile çarpılmış bir ifade olmalıydı. (İkinci yasaya göre -, ama a kütleden bağımsız, örneğin dünya yüzünde g sabiti.)

Üçüncü yasaya göre ise, düşen cisim de dünyayı çekmektedir, yani dünya da çekilen cisim olarak kabul edilebilir, öyleyse genelçekim kuvveti ifadesi dünyanın kütlesini de çarpan olarak içermelidir. Bu akıl yürütmelerle Newton, şu yasaya ulaştı:

-

- *Ama yalnızca bir karşılaştırmayla yasa olmaz ki! 60'dan 3600 elde etmenin en basit yolu karesini almak, ama bin türlü başka yolu da bulunabilir. Örneğin, 60 ile çarpmak, 3540 ile toplamak, 10 ile çarpıp 3000 ile toplamak...*

- Tamamen haklısın. Gerçi Occam'ın Usturası ilkesi[12] bize en basit yolun doğru olma olasılığının yüksek olduğunu söyler, ama Newton yukarıda söylediğimiz yasayı hemen geçerli kabul etmedi. Kendisine şu soruyu sordu: Eğer Güneş'in kütlesi, bir gezegeninkinden çok büyükse, böyle bir kuvvetin etkisi altında bir gezegenin hareketinin mümkün olan en genel hali nedir?

1212) Ustura kelimesinin kullanılması, bu ilke ile gereksiz varsayımların traşlanmasını belirtiyor.

- *İyi de, yasa "noktasal cisimler" diyor. Güneş de, gezegenler de noktasal değiller.*

- İkisi de aralarındaki mesafeye göre küçük iseler, noktasal oldukları yaklaşımı, kötü sonuç vermez. Ama aslında buna da gerek yok. Bu yasanın şöyle bir güzel tarafı var: Küresel simetrisi olan, yani merkezi sabit kalmak şartıyla herhangi bir şekilde döndürüldüğünde kütle dağılımı değişmeyen bir cismin çekimsel etkisi, sanki tüm kütlesi merkezine toplanmış gibi çıkıyor. Dolayısıyla Newton, Güneş ve gezegen noktasalmış gibi düşünebilirdi.

Bu soruyu matematiksel olarak ifade edersen, bir diferansiyel denklem bulursun. Ama Newton'un zamanında diferansiyel denklem kavramı yoktu, kimse böyle bir şey bilmiyordu.

- *Ben de bilmiyorum, nedir diferansiyel denklem?*

- Bilinmeyenin yalnız kendisini değil, türevini ya da türevlerini de içeren denklem.

- *Bir dakika, düşüneyim.... Gezegenin hareketini bulmak istediğimize göre, bilinmeyenimiz... konum. Hız, konumun türevi, ivme hızın türevi... O da ikinci yasa gereği kuvvet ile ilişkilendirileceğine göre... bu tür bir denklem çıkması normal.*

- Doğru. Doğru da, Newton'un zamanında türev kavramı da yoktu.

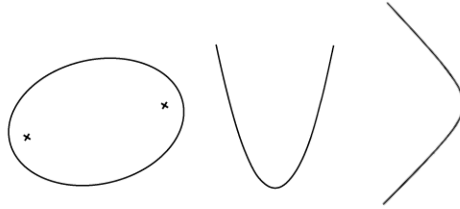
- *Peki, ne yaptı?*

- İcat etti. Yalnızca soruyu matematiksel olarak ifade edebilmek için bile, türev kavramını icat etmesi gerekti. Çözebilmek için de türevin ters işlemi olan integrali icat etti.[13] Ve çözdü.

13)Newton ile paralel olarak türev, integral ve bazı ilgili kavramları Leibniz de keşfetti. Hatta uzun süre, kimin keşfi daha önce yaptığı konusunda tartışmalarla geçti. Newton, türev ve integrali fiziksel problemleri çözmek için kullandı, ama bunları daha eski moda geometrik bir dilde bunları ifade etti. Leibniz'in kullandığı matematik dili ise, günümüzdekine daha yakındır.

- *Yüksek matematik derslerinde okunan diferansiyel ve integral hesabı da Newton icat etti demek... Boşuna az evvel saygıyla eğilmemişim... Peki tam olarak ne buldu?*

Üç tür yörüngenin mümkün olduğunu buldu: Elips, parabol ve hiperbol şeklinde yörüngeler. (Şekil 14)



Şekil 14. Elips ve odakları, parabol ve hiperbol.

Gezegenlerin yörüngelerinin elips şeklinde olduğu, daha önce Tycho Brahe'nin 20 yılda topladığı verileri yine bir 20 yıllık zahmetli hesaplarla analiz eden Kepler tarafından bulunmuştu. Tycho'nun gözlemevi, teleskopsuz yapılabilecek en hassas gözlemleri yapabilecek özelliklerdeydi[14] ve bu hassaslık Kepler'in Batlamyus ve orijinal Kopernik modellerini yanlışlaması için yeterli oldu. Bu arada bu yörüngelerde Güneş, merkezde değil, elipsin odaklarından birindedir.

14)Tycho ile eşzamanlı olarak İstanbul'da da Takiyüddin adlı bir astronom, çok benzer özelliklerde bir gözlemevi kurmuş, ancak iç politik çekişmeler ve boş inançlar yüzünden, kısa bir çalışma döneminden sonra gözlemevi tahrip edilmiştir. Tycho'ya dek en mükemmel ölçümler ise ondan 200 yıl kadar önce Semerkant'ta Uluğ Bey tarafından yapılmıştı.

Kepler yasaları, bir bakıma büyük bir devrimdir: İlk kez gökcisimlerinin hareketleri “mükemmel” daire(ler) cinsinden değil de, başka bir geometrik şekille betimleniyordu. Öte taraftan, tam anlamıyla yasa da sayılmazlar, çünkü yalnızca betimlerler; bir anlamda toplanmış verilerin özetidir. Tabii ki çok iyi bir özettirler; bir gezegen için Batlamyus’un 10, Kopernik’in sekiz parametresini, dört parametreye indirir; karmaşık, fiyonklu yörüngeyi basit, düzgün elipse indirger. Ancak, “Neden böyle hareket ediyor?” sorusunu cevaplamazlar. Newton’un çözümleri ise, **açıklayıcıdır***;* çünkü bu yörüngeler, “Kuvvet buysa, hareket nasıldır?” sorusunun cevabı olarak bulunmuştur. Bunların, Kepler’in formülasyonuyla çakışması, Newton’un hem hareket yasalarının, hem de genelçekim yasasının sağlaması olmuş, ancak bu sonuç ile bu kuramlar genel kabul görmüştür. Ayrıca, çözümde, daha önce düşünülmemiş olan parabolik ve hiperbolik yörüngeler de çıkmaktadır. Bu yörüngeler, sonsuzdan gelip, Güneş’in yakınından sadece bir kez geçerek tekrar sonsuza giden gökcisimlerine (bazı kuyrukluyıldızlar gibi) karşılık geldiklerinden, eskilerin bunları incelemiş olmaları beklenemezdi.

Ancak, Newton’un gezegen hareketlerini açıklaması da büyük bir devrimdir: Gezegenler, düşen elma ya da havada uçan top mermisi ile aynı yasalara uymakta, aynı kuvvetlere maruz kalmaktadırlar. **Yersel (fani)-göksel ayrımı kalkmıştır***.* Artık bilimsel olarak kozmoloji (evrenbilim) yapabiliriz, çünkü evrenin başka yerlerinde kurallar farklı değildir—

- Bu yüzden “evrensel çekim yasası” deniyor herhalde...

- Bir başka deyişle, yalnızca bizim konumumuz özel olmamakla kalmıyor; evrende hiçbir özel konum yok. Newton’un yerdeki ve gökteki cisimlerin çekimden etkilenmelerini aynı yasaya bağlaması ile başlayan (ve şimdiye kadar yanlışlandığına şahit olmadığımız) bu kabul sayesinde, burada, yani dünyada yapacağımız çalışmalarla bütün evreni anlamayı ümit edebiliyoruz.

10- Galileo göreliliğinde dönüşüm nasıl yapılır?

- *Yani gözlemcinin yalnızca hızı değil, konumu da fark etmiyor.*

- Evet. Hız konusuna dönersek, madem mekaniğin yasaları Newton yasaları ve bunların matematiksel ifadeleri var; bu yasaların, eşdeğer olduğuna karar verdiğimiz tüm gözlemciler için aynı olduğunun matematiksel gösterimi de olması gerekir. Çoban ile makinisti hatırlıyor musun? Hani çoban makinistin verilerini, kendi ölçseydi bulacağı verilere dönüştürmüştü. Yasalar ise bu verilerin kendi içinde sağladığı bazı ilişkiler olduğuna göre, **iki gözlemciye göre yasanın aynı olması, dönüşümün matematiksel doğasında olan bir şey olmalı.** Yani, dönüşümün yasaya da etki edip, yasayı değiştirmediği gösterilebilmeli.

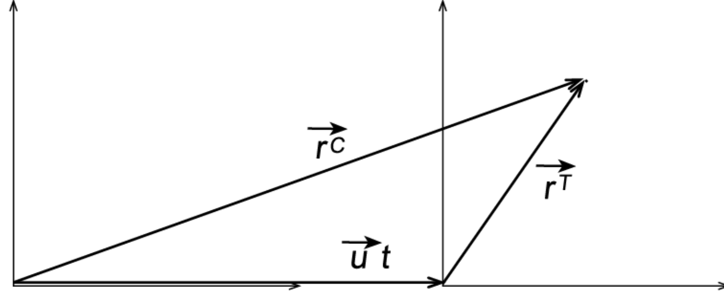
- *Nasıl bir şey bu dönüşüm?*

- Einstein öncesinde göreliliği gerçekleyen dönüşüm kümesine Galileo dönüşümleri deniyor. Anlamak için, hareket verilerinin, mümkün olduğu kadar çok an için konumun[15] ölçülmesi olduğunu (Tablo 1 gibi) hatırlayalım ve çoban ile makinist örneği çerçevesinde düşünelim. Konumu, gözlemcinin merkez kabul ettiği yerden gözlenen cisme uzanan bir ok ile temsil edebiliriz. Gözlemci, bu noktadan çıkan birbirine dik üç eksen kullanırsa, bu okun eksenlere izdüşümleri de x, y, z verileri olur. Bu eksenlere **koordinat sistemi,** x, y, z değerlerine ise cismin **koordinatları** denir.[16] Bu arada, dik eksenlerden oluşan koordinat sistemine, kartezyen[17] denir. Sonuç olarak dönüşüm, bir gözlemcinin verilerinden diğerini üretecek bir dizi formülden oluşur.

15)Lise ve üstü öğrencileri için tekrar hatırlatıyorum; $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ fonksiyonlarının.
16)Üniversite öğrencileri için: Bu ok, konum vektörüdür, $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ de onun bileşenleri.
17)Descartes'in isminden dolayı.

- *Zor mu bu formüller?*

- Hayır canım, yalnızca ilkokuldan beri bildiğin dört işlemi içeriyor. Anlamını görsel olarak anlatmak için, çoban ve makinist meselinin şeklini, koordinat sistemlerini ve konumu belirten okları gösteren, ama arka planı göstermeyen bir şekilde tekrar çizelim:



Şekil 15. Çobanın koordinat sistemi, makinistin koordinat sistemi ve karga. Yani Şekil 1'in soyutlaştırılmış hali.

Trenin hızına *u* der, *x* eksenlerini trenin hareket yönüne çevirir, kronometremizi koordinat sistemi merkezleri çakıştığı anda başlatır ve çobanın ölçtüğü büyüklükleri *C*, trenden ölçülen büyüklükleri *T* üst-indisiyle gösterirsek, dönüşüm şu şekillerde yapılır:

-

Biraz dikkatli olarak durumu incelersek, buradaki ana fikrin, çobanın ölçtüğü makinist-karga okunun (vektörünün), makinistin ölçtüğü makinist-karga oku (vektörü) ile aynı kabul edilmesi olduğunu görebiliriz.

- *Aynı değil mi?*

- Bu hiç açık değil... Nitekim, Einstein özel göreliliğinde aynı olmayacak. Ancak, 4. Soru'da yasalar için bahsettiğimiz gibi, bu dönüşümler de günlük hayatımızda gördüğümüz hızlar için pratikte doğru.

- *Nasıl pratikte?*

- Yani özel görelilikteki daha sonra göreceğimiz dönüşümden milyarda, trilyonda bir veya daha az farkı oluyor.

Şimdi dönüşümün yasaya etkisini konuşalım... Madem yasamız ivme ile kuvvetin orantılı olduğudur; dönüşümün ivmeyi nasıl etkilediğini bulmamız gerekiyor. 8. Soru'da konuştuğumuz gibi, ivme, "hızın değişme hızı"dır. Öyleyse hız ile başlayalım. O da "konumun değişme hızı"... Üstteki dönüşümleri biraz incelersek,[18] alt-indislerle bileşenleri göstererek, hız için şunları buluruz:

[18])Üniversite öğrencileri için: v_x'in x'in zamana göre türevi (diğer boyutlar için de aynı şey) olduğunu hatırlayıp dönüşümün zamana göre türevini alırsak, hızların dönüşümünü buluruz.

-

Bu arada v ile gösterdiğim bu hızların gözlemcilerin herhangi birine değil, gözlenen cisme ait olduğunu tekrar hatırlatayım; örneğin cevize veya kargaya. Etkiyi biraz daha iyi anlamak için ise, hızın tamamen raylara paralel olduğu durumu düşünelim. O zaman v_y ve v_z sıfır olur ve ters dönüşüm olarak $v^C = v^T + u$ buluruz. Yani 10 m/s hızla giden trenden makinist 15 m/s hızla öne doğru bir top fırlatsa, çoban bu topun hızını 25 m/s olarak ölçer.

- *Bu bana çok doğal geliyor...*

- Evet, günlük hayatımızdaki deneyimlerimizle çok tutarlı, değil mi? Biz ivmeye doğru devam edelim. Trenin hızı u sabit olduğu için, hemen yukarıdaki hız dönüşümü ifadelerindeki "hızların değişme hızı"nı etkilemez; dolayısıyla[19] ivme için,

[19])Üniversite öğrencileri için: a_x'in v_x'in zamana göre türevi olduğunu vd. hatırlayıp hız dönüşümünün zamana göre türevini alırsak, ivmelerin dönüşümünü buluruz.

-

buluruz. Yani bir karga için, çobanın ve makinistin gözledikleri ivme eşittir—

- Gözledikleri kuvvet de eşit olduğuna göre, biri için Newton'un ikinci yasası geçerliyse, öbürü için de geçerli! Anladım, değil mi?

- Evet, Galileo göreliliğini anladın. İşte, yasanın bu değişmezliği sayesinde dünya üzerinde geliştirdiğimiz bilim ve onun üzerine kurduğumuz teknoloji, Dünya'nın Güneş etrafındaki saniyede 30 km'lik hızından, Güneş'in gökada merkezi etrafındaki hızından vs. etkilenmiyor.

Ancak, özel görelilikte -düşük hızlarda Galileo dönüşümüne yaklaşsa da- farklı bir dönüşüm kullanacağımız için, söylediğin iki gözlemcinin gözledikleri kuvvetin eşit olmasını, söylemeye gerek bile duymadığın iki gözlemcinin kütleyi eşit almaları konularını, hatta kütlenin tanımını daha dikkatli bir şekilde tekrar düşünmemiz gerekecek. Aslında dönüşümlerin kendisinde de yazılmaya gerek bile duyulmayan, ancak özel görelilikte değişecek bir öğe var, zamanı gelince konuşacağız.

Bu arada, Şekil 15’e tekrar bakarsan, şekilde çobanın, trenin, makinistin olmadığını, yalnızca iki koordinat sisteminin olduğunu göreceksin. Zaten dönüşüm formülleri de, yalnızca cisimlerin koordinatlarını içeriyor; yani aslolan koordinat sistemleri, burada tren ve çobanın ayağının bastığı toprak, yalnızca koordinat sistemlerinin taşıyıcıları. Bu yüzden, genellikle biz “gözlemci” ibaresini “koordinat sistemi” ibaresi ile denk olarak, ya da onun daha kısa bir ifadesi olarak kullanırız, illa bir kişiyi, bir insanı kastetmeyiz.

Son olarak, bir gözlemcinin diğerine göre hızının (hani dönüşümde *u* ile gösterdiğimiz) sabit olması gerektiğini tekrar vurgulayayım. Bu hız sabit olmasa, iki gözlemcinin (çoban ve makinist gibi) gözledikleri ivme eşit olmazdı; dolayısıyla biri için Newton yasalarının geçerli olması, diğeri için de geçerli olmasını gerektirmezdi. Yani **mekaniğin temel yasalarının geçerli olduğu tüm koordinat sistemleri, birbirlerine göre sabit hızlarla hareket ederler.**

11-İvmelenen sistemlerde neden (merkezkaç gibi) sanal kuvvetler algılanır? Bir kuvvetin fiziksel olup olmadığına nasıl karar verebiliriz?

- *Mekaniğin temel yasalarının geçerli olmadığı koordinat sistemleri de mi var?*

- Tabii. Trende, bir masanın üzerine bir bardak koy. Trenin hızı sabit ise, bardak yerinde durur, yani eylemsizlik ilkesine uyar. Ama hız sabit değilse, örneğin istasyona girmek için tren fren yapıyorsa, bardak trenin önüne doğru hareketlenir. Onu öne doğru iten bir kuvvet olmadığına göre, bu hareketlenme eylemsizlik ilkesini, dolayısıyla mekaniğin temel yasalarını ihlal eder. Bu örneğin gösterdiği gibi, ivmelenen koordinat sistemlerinde (yavaşlamak da bir ivmedir, yalnızca hız ile zıt yönde, bir diğer deyişle negatiftir) mekaniğin temel yasaları tam olarak geçerli değildir.

- *Neye göre ivmelenen?*

- Mekaniğin temel yasalarının geçerli olduğu koordinat sistemlerine göre.

- *Bardağa kuvvet etki etmediği doğru değil ki. Yerçekimi var, sürtünme var... Dolayısıyla zaten eylemsizlik ilkesinin şartları sağlanmıyor...*

- Masa üzerindeki bir cisme etki eden yerçekimi kuvveti, masanın uyguladığı “normal kuvvet” ile dengelenir; bu kuvvet olmasaydı, cisim masanın içine batardı—

- *Bu kuvvet de nereden çıktı? Bir dergide okuduğum kuvvetler listesinde dört kuvvet vardı, ama böyle bir şey yoktu.*

- O liste temel kuvvetlerin listesi, sürtünme de yoktur o listede. Normal kuvvet, birbirine değen iki katı cismin atomlarına ait elektronların birbirlerini itmelerinden kaynaklanır, o sayede dünya bizi aşağıya doğru çektiği halde yerin içine batmıyoruz. Sürtünme ise, harekete engel olmaya çalışır, yani öne giden bardak için arkaya doğru etki eder, öne hareketlenmeyi açıklamaz. Zaten masa üstünün sürtünmesiz olduğu durumu da düşünebilirdik...

- *Tamam, çözdüm. Tren yavaşlıyor, ama bardak eylemsizlik ilkesi gereğince yavaşlamıyor, o yüzden trenin önüne doğru gidiyormuş gibi görünüyor.*

- Bu, raylara sabitlenmiş bir koordinat sistemine göre doğru. Ama ya benim koordinat sistemim trene sabitlenmişse? Bu sistemde masanın konumu sabit, bardağın konumu değişiyor... Kaçış yok, bu koordinat sisteminde Newton yasaları tam olarak geçerli değil.

İşte mekaniğin temel yasalarının geçerli olduğu koordinat sistemlerine, **eylemsiz koordinat sistemleri** deniyor. (Bu yasaların ilki eylemsizlik ilkesi olduğu için.) Bu sistemlerin birini bulursanız, hepsini bulmuş olursunuz, çünkü hepsi sizin bulduğunuza göre sabit hızlarla hareket ederler. (Önceki sorunun sonu.)

Ancak sabit hızla hareket ederken, eksenlerinin dönmemesi gerekir, çünkü dönme de bir çeşit ivmedir. (Bkz. Soru 8.) Böyle bir sistemin pratikte nasıl olacağı sorusuna Newton, “sabit yıldızlara göre dönmeyen” diye cevap vermişti. Çünkü yıldızlar o kadar uzaktır ki, bakış yönümüze dik bir hareketleri olsa bile, ona baktığımız açının değişimi bir insan ömrü boyunca gözle fark edilemeyecek kadar küçüktür; dolayısıyla yıldızların yönünün pratikte değişmediğini kabul edebiliriz. (Bu, 5. Soru’da konuştuğumuz “gök kubbe” kavramının

oluşmasına yol açmıştı.) Günümüzde de bu tanım kullanılabilmektedir, yönlendirme hassasiyetine ihtiyacı olan bazı uzay araçlarında, yıldız takip edici sistemler kullanılarak, eksenleri belli yıldızlara yönelik tutup, böylece koordinat sistemlerinin dönmemesi, yani roketsiz uçuş sırasında eylemsiz olması sağlanır.

- *Dönmekten bahsetmişken... Merkezkaç kuvvetinin fiziksel olmadığını söylemiştiniz 2. Sorunun başlarında.*

- Biraz önce bahsettiğimiz yavaşlayan treni düşün. Masanın üzerindeki bardak, ileriye doğru hareketlendiğinde, zihnimiz bu hareketlenmeye bir kuvvet atfeder. Hele tutunamayıp, ileri hareketlenen bizsek, bir kuvvetin bizi öne çektiğini düşünürüz. Ama aslında yalnızca, tren bizden daha çabuk yavaşlamaktadır.

Ya da dönen bir platformda, arkası dışarı bakan bir sandalyede oturduğunu düşün. Sandalyenin arkalığı sırtına bir kuvvet uygular. Sen, sandalyede sabit olduğunu düşündüğün için (yani dönen koordinat sisteminde konumun değişmediği için), sandalye arkalığının uyguladığı kuvvetin bir başka kuvvet tarafından dengelendiğini düşünürsün. Merkezkaç kuvvet, işte budur.[20] Halbuki, eylemsiz koordinat sistemine göre, sandalye arkalığının uyguladığı kuvvet tek kuvvettir, merkezkaç kuvveti yoktur.

20)Ayrıca, dönen platformda sandalyede oturmayıp, yürümek istersen, yalnızca merkezkaç kuvveti değil, Coriolis kuvveti denen başka bir kuvveti de hissedersin.

- *Ama tek kuvvet varsa ivmelenmem gerekmez mi?*

- İvmeleniyorsun zaten! Can alıcı nokta bu. Eylemsiz koordinat sisteminde, sen düzgün dairesel hareket yapıyorsun, bu da merkeze doğru ivme demektir. Şekil 10’u hatırla.

- *Hımm... Eylemsiz sistemde sandalyenin arkalığı beni itiyor (bunu hissedebiliyorum), başka kuvvet yok, o yüzden -’ya göre ivmem var, o da merkezcil ivme... Dönen sistemde ise, fiziksel kuvvetten başka bir de sanal merkezkaç kuvvet “var”, bu ikisi birbirini dengeleniyor, dolayısıyla ivmem yok... Öyle mi?*

- Öyle. Özetle, mekaniğin temel yasaları, aslında eylemsiz olmayan koordinat sistemlerinde geçerli değiller; geçerliymiş gibi düşünülmeye çalışıldığında bu tür sanal kuvvetler ortaya çıkıyor.

- *Peki dönen ortamlardaki sanal kuvvetlerin ismi var da, düzgün ivmelenen sistemlerdekilerin niye yok?*

- Uzun süre düzgün ivmelenen sistemlerle pek karşılaşmayız da ondan... Bir tren ya da otomobil, en fazla 20 saniye kadar hızlanır, son hızına ulaşınca artık hızlanamaz. Halbuki bir atlıkarınca saatlerce dönebilir; dünya veya başka bir gezegen ise neredeyse sonsuza kadar. Bu yüzden dönen sistemlerdeki sanal kuvvetlerin etkisini tutarlı olarak görebiliyoruz, dolayısıyla bunlara isim veriyoruz.

- *Hissettiğim ya da gördüğüm bir kuvvetin sanal mı, gerçek mi olduğunu bilmemin bir yolu var mı?*

- Fiziksel kuvvetler Newton'un üçüncü yasası uyarınca, iki cisim arasında etkindir, yani bir etkilenen varsa, bir de o kuvveti etki ettiren vardır. Bir kuvvet için "Kim ya da ne etki ettiriyor?" sorusunun cevabı varsa, o kuvvet fiziksel, yoksa sanaldır. Örneğin dönen platformda otururken sırtına etki eden kuvveti sandalyenin arkalığı etki ettirmektedir, merkezkaç kuvvetini ise neyin/kimin etki ettirdiği sorusunun cevabı yoktur.

- *Bu da bir koordinat sisteminin eylemsiz olup olmadığını anlamanın bir yolu galiba...*

- Evet; gördüğümüz kadarıyla bir başka cisimle etkileşimde olmayan cisimler hızlarını değiştirmiyorsa, sistemimiz eylemsizdir. Etkileşim görmediğimiz halde, hızını değiştiren bir cisim varsa, ya henüz fark etmediğimiz bir etkileşim vardır, onu ararız; ya da sistemimiz eylemsiz değildir.

4. Bölüm - EINSTEIN ÖZEL GÖRELİLİĞİ

12- Esîr nedir?

- *Newton yasalarından bahsettik. Ama bunlar mekaniği kapsıyorlar ve fizik, mekanikten ibaret değil. 3. Soru'da elektromanyetizmadan bahsetmiştiniz...*

- 8. Sorunun sonuna doğru bahsettiğimiz gibi, Newton yasaları istatistikle birleşince, termodinamiği de açıklıyor. Elektromanyetizmanın temel yasaları ise 19. yüzyılda geliştirildi. Bunların, matematiksel şekli çok karışıktır, yazmayalım; ama kelimelerle anlatmaya çalışayım:

Birincisi olan elektrik Gauss yasası; duymuş olabileceğin Coulomb yasasına eşdeğerdir ve görsel olarak şu anlama gelir: Elektrik alan çizgileri ancak pozitif elektrik yüklerde başlayabilir ve negatif elektrik yüklerde bitebilir. Bir yükte başlayan ya da biten alan çizgisi sayısı, yükün büyüklüğüyle orantılıdır. Elektromanyetizmanın ikinci temel yasası ise, manyetik Gauss yasasıdır ve manyetik alan çizgilerinin başladığı veya bittiği yüklerin olmadığını söyler.

- *Başlamıyor ve bitmiyorsa, nasıl var olabilirler ki?*

- Bir çemberin başı-sonu var mı? Bu çizgiler kapalı eğriler olabilir ya da sonsuzdan gelip sonsuza uzanabilir... Aslında elektrik alan çizgileri de böyle olabilir; başlamak ve bitmek zorundadırlar demedik; ancak yüklerde başlayabilir veya bitebilirler dedik. Yasaların üçüncüsü, Ampére-Maxwell yasası, manyetik alanların, elektrik

akımlar ya da değişken elektrik alanlar tarafından, çevrelerinde oluşturulduğu anlamına gelir.

- *Ama manyetik alanlar mıknatıslarla da oluşturulabiliyor...*

- Biliyorsun ki, atomların içinde, bir anlamda çekirdeğin etrafında dönen elektronlar vardır. Elektronlar yüklü olduğu için bu hareket, bir akıma eşdeğerdir. Ama elementlerin çoğunun atomlarında, bu akımların manyetik etkileri birbirini dengeler. Az sayıda elementin atomlarında ise, bu etkiler tam olarak dengelenmez ve net bir manyetik alan oluşur. Mıknatıslar, işte bu elementlerden yapılır.

Son olarak, Faraday yasası, elektrik alanların yalnızca elektrik yükler tarafından değil, değişken manyetik alanlar tarafından da çevrelerinde oluşturulabileceğini söyler. Bunların tamamına da Maxwell yasaları ya da denklemleri denir—

- *İsimlerden anladığım kadarıyla bunların hepsini Maxwell bulmamış ama herhalde Newton yasalarında olduğu gibi bunları da tutarlı bir sistem haline getiren Maxwell olduğu için böyle adlandırılıyorlar, değil mi?*

- Evet, aynen öyle. Ancak, 19. yüzyıl fizikçilerinin büyük bir sorunu vardı: 3. Soru’da biraz çıtlattığımız gibi, Newton yasalarının aksine, Maxwell denklemlerine 10. Soru’da gösterdiğimiz Galileo dönüşümünü uyguladığımızda, tekrar Maxwell denklemlerini elde etmeyiz. Yani elektromanyetizmanın temel yasaları, yalnızca bir koordinat sisteminde geçerli gibi görünüyordu!

- *Aristoteles’in dönüşü...*

- Ve esîrin—

- *Esîr de ne?*

- Eski Yunan’da, doğada boşluk olmayacağı, dolayısıyla her yeri, -bize tamamen boş görünen yerler dahil- dolduran bir maddenin var olması gerektiği düşünülüyor; adına da esîr deniyordu. Esîr zaten her yeri doldurduğu için hareket etmiyordu; yani bir anlamda durağan bir koordinat sistemi oluşturuyordu.

19. yüzyıl fizikçileri de doğada boşluk olmayacağını düşünüyorlardı, hatta bu düşünce “Doğa boşluktan nefret eder” diye ifade ediliyordu, dolayısıyla onlar da her yeri dolduran bir maddesel ortama kuramsal olarak ihtiyaç duyuyorlardı. Ayrıca, elektromanyetizmanın temel yasaları, elektromanyetik dalgaların var olması ve hızlarının ışık hızına eşit olması gerektiğini gösteriyordu—

- Hangi gözlemciye ya da koordinat sistemine göre?

- Yasalar yalnızca bir koordinat sisteminde geçerli gibi göründüğüne göre, o sistemde. Bu arada, ışık da yalnızca elektromanyetik dalgaların bir frekans bölgesine karşılık gelir: Hızların aynı çıkması tesadüf değildir. Bu dalgaların bir ortama ihtiyacı olduğu düşünüldü; aynen sesin bir ortam (örneğin hava) içinde yayılması ve hızının bu ortama göre tanımlanması gibi. Bu rol için esîr biçilmiş kaftandı: Güneş'ten ya da yıldızlardan dünyaya ışık geldiğine göre, bu ortam bize boş gelen yerlerde de varolmalıydı. Yani 19. yüzyıl fizikçilerine göre **esîr, her yere nüfuz eden, onun sabit olduğu koordinat sisteminde elektromanyetizmanın temel yasalarının geçerli olduğu, dolayısıyla ışığın saniyede 300.000 km hızla gittiği bir ortamdı ve elektromanyetik dalgalar, bu ortamın titreşimlerinden oluşuyordu.**

13-Işık ve diğer elektromanyetik dalgalar nasıl yayılır?

- Işık ile elektromanyetik dalgalar arasındaki ilişkiyi biraz açabilir misiniz?

- En kısa tanımıyla ışık, elektromanyetik dalgaların, insan gözünün algılayabildiği frekanslarına -ya da bir başka bakış açısıyla, dalga boylarına- denir.

- Elektromanyetik dendiğine göre, bu dalgalarda hem elektrik, hem manyetik alan "dalgalanıyor." Nasıl? Yalnızca elektrik ya da yalnızca manyetik dalga var mı?

- "Dalgalanan" bir manyetik alan düşün. Bu alan, değişken olduğuna göre, çevresinde bir de elektrik alan yaratır; Faraday yasasını hatırla. Dolayısıyla yalnızca manyetik bir dalga olamaz. Peki bu elektrik alanın bir etkisi var mı? Eğer onu yaratan manyetik alanın zamana göre değişkenliği uygun bir şekildeyse, elektrik alan da değişken olur ve Ampére-Maxwell yasasına göre, çevresinde bir manyetik alan yaratır. İlk manyetik alanın çevresinin çevresinde bu

manyetik alan oluştuğundan, sonuçta alan ilerlemiş olur ve bu böyle devam eder...

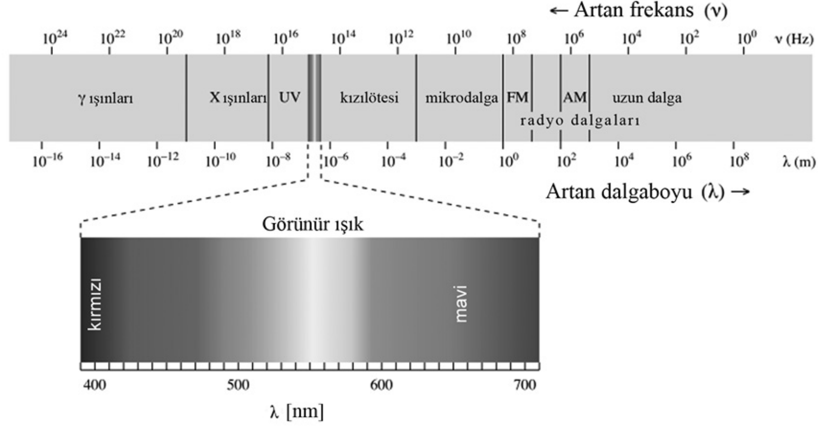
- *Yani tavuk-yumurta-tavuk-yumurta-tavuk-... gibi...*

- Evet de, senin örneğinde aslında horoz da var; onun burada bir karşılığı yok. Bu ayrıntıyı ihmal edersek, Faraday yasası, yani senin benzetmene göre tavukların yumurtladığı, daha önce bulunmuştu; ama yumurtadan tavuk çıktığı, yani Maxwell'in Ampére yasasına yaptığı ekleme, bu yasaların bulunan son parçasıydı ve gördüğün gibi, elektromanyetik dalgaların anlaşılabilmesi için şart. Ayrıca, az önce betimlediğimiz dalga davranışını matematiksel olarak analiz edince çıkan dalga denklemi, bize dalganın hızını elektromanyetizmanın temel sabitleri cinsinden verir ve rakam olarak hesaplandığında, ışığın hızıyla (c ile gösterilir) aynı çıkar. Bu çakışma, ışığın bir elektromanyetik dalga olduğu fikrine çok sağlam bir destek oluşturmuş ve bunun üzerine optik olayları Maxwell yasaları cinsinden açıklama çabası başlamış ve başarılı da olmuş, bunu Heinrich Hertz deneylerle de göstermiştir. Bu başarı ise, optiğin, temelde fiziğin ayrı bir dalı olmayıp, elektromanyetizmanın bir altdalı haline gelmesi; sonuçta evrenin daha az sayıda yasa ile anlaşılabilmesi demektir. Bu yüzden Maxwell'in katkısı, denklemlerin ufak bir parçası gibi görünmekle beraber, çok önemlidir; hem de denklemlerin ya da yasaların bütünlüğü ismi ile anılacak kadar...

- *Işık, elektromanyetik dalgaların bir kısmıdır dediniz. Diğer kısımları nelerdir?*

- En düşük frekanslı, yani en uzun dalga boylu olanlara, radyo dalgaları denir. Dalga boyu yaklaşık 1 m - 1 mm arasındakilere mikrodalga, onlarla görünür ışık arasındaki frekanslara ya da dalga boylarına da kızılötesi (bazen kızılaltı, enfraruj, infrared) denir. Görünür ışığın dalga boyu yaklaşık 400-700 nm[21] arasıdır; üstündeki frekanslara da morötesi (bazen ultraviyole) denir. Sonra X, sonra da γ (gamma) ışınları gelir. (Bkz. Şekil 16)

21)m'nin (metre) önündeki n, nanonun kısaltmasıdır ve bu da milyarda bir demektir.



Şekil 16. Elektromanyetik dalgaların frekans ya da dalga boyuna göre sınıflandırılması.

- *Bir de alfa ve beta ışınları yok muydu?*
- Onlar dalga değil, parçacık akımıdır. Radyoaktivite çerçevesinde ilk keşfedildiklerinde bunların dalga-parçacık ayrımı yapılamamıştı, o yüzden alfa-beta-gamma diye isimlendirilmişlerdi. Beta parçacıkları elektrondur, alfa parçacıkları ise iki proton, iki nötrondan oluşur.

14-Işık hızı c, neden gözlemciye göre değişmez?

- *Ama bir önceki soruda esîr kavramından bahsetmediniz...*
- Evet, gözlemci ya da koordinat sisteminin esîre göre olan hızından ya da esîrin özelliklerinden bahsetmedim, zaten Maxwell denklemlerinin hiçbir yerinde de böyle bir şey geçmez; yalnızca boşluğa atfedilen iki sabit vardır.

Soru 12'de bahsettiğimiz gibi, elektromanyetik dalgalardan önce bilinen dalgalar, yani deniz dalgaları, ses dalgaları vb. varolabilmek için bir ortama ihtiyaç duyarlar; boşlukta ses duyulmaz, deniz dalgası kumsalda biter. Bu ortam, yalnızca dalganın varlığı için gerekli olmakla kalmaz, dalganın başta hızı olmak üzere, bazı özelliklerini de belirler. Örneğin, ses dalgalarının hızını hesaplamak için, uyduğu

dalga denklemi çıkarılırken, havanın sıkıştırılabilirlik özellikleri, yoğunluğu vs. hesaba katılır.

Bu tecrübelerin ışığında oluşturulan esîr hipotezi biraz geliştirilip, elektromanyetik dalgaların özelliklerini açıklamak için mekanik modeller oluşturuldukça, garipleşmeye başladı: Örneğin, ışığın yüksek hızını açıklamak için esîrin yayılma yönünde son derece sert, buna dik yönde ise son derece yumuşak olması, aynı zamanda gezegenlerin hareketlerine hiç direnç göstermemesi gerekiyordu. Maxwell denklemlerinde de esîr hakkında bir ipucu olmadığına göre, Einstein, esîri varsaymanın ve ona çeşitli özellikler atfetmenin, kuramı gereksiz olarak karmaşıklaştırmak olduğu sonucuna vardı.

- *Esîre çelişkili özellikler atfedilmesine rağmen, neden Einstein'dan öncekiler bu olasılığı irdelemediler?*

- Çünkü esîrin varolmaması, Maxwell yasalarının her eylemsiz gözlemciye göre geçerli olması, dolayısıyla elektromanyetik dalgaların hızının her eylemsiz gözlemciye göre c olması anlamına geliyordu. Ancak, günlük deneyimlerimize ve içgüdülerimize ilk bakışta böylesine aykırı görünen bir önermeyi ne kabul edecek, ne de bu önermenin ve Maxwell denklemlerinin hem Galileo dönüşümleriyle tutarsız, hem de her eylemsiz gözlemciye göre geçerli olması çelişkisinin sonuçlarını gittikleri yere kadar takip edecek cesareti, Einstein'dan önce kimse gösteremedi. Belki de Einstein'ın bu cesareti; dehası ve kişiliğinden başka, kaybedecek bir akademik kadrosunun, kürsüsünün ya da itibarının olmamasından da kaynaklandı: Mezuniyetinden sonra üniversitelerde asistanlık bulamamış, patent bürosunda memur olarak çalışarak doktora yapıyordu.

- *Yani ışık hızının tüm eylemsiz gözlemcilere göre aynı olması, elektromanyetizmanın temel yasalarının ek bir bileşen (esîr) gerektirmeden doğru olması ve görelilik ilkesi konularındaki ısrarın sonucu, öyle mi?*

- Tamamen doğru. Alternatif olarak bu aynılık, Einstein (özel) göreliliği elektromanyetizmayı karıştırmadan anlamak/anlatmak istenildiğinde temel çıkış noktası (aksiyom ya da postulat) olarak da kullanılabiliyor; ancak bence görelilik ilkesi ve Maxwell denklemlerini temel çıkış noktası olarak kullanmak daha doyurucu. Biz de ışık hızının gözlemciye göre değişmezliğini zaman zaman kullanacağız.

15-Işık hızının değişmezliğiyle ilgili Michelson-Morley deneyi nedir?

- *Peki ışık hızının tüm eylemsiz gözlemcilere göre aynı olmasının deneysel ya da gözlemsel desteği var mıdır?*

- Bir ortam tarafından taşınan bir dalganın, ortam özelliklerince belirlenen hızı, bu ortama göre olan hızdır. Eğer gözlemci ortama, ya da ortam gözlemciye göre hareket ediyorsa, farklı bir hız gözlenir; aynen akıntıyla birlikte giden bir teknenin kıyıya göre hızının artması gibi. Bir dalga örneği vermek gerekirse, rüzgâr eserken bir gözlemcinin ölçeceği ses hızı, rüzgâra karşı yönde düşük, aksi yönde yüksek olur; sesten hızlı bir uçaktakiler, arkadan gelen bir sesi duyamaz.

Dolayısıyla eğer esîr varsa ve gözlemci esîre göre hareket halindeyse, ışığın hızı da benzer farklılıklar gösterecektir; bu farklılıkların gözlenmesi ya da olmadığının gösterilmesiyle esîrin varlığı ya da yokluğuna karar verilebilir—

- *Ama esîrin -varsa tabii- örneğin gezegen hareketlerine hiçbir direnç göstermemesi gerektiğini söylemiştiniz. Bunu genelleştirirsek, esîrin madde ile mekanik etkileşime girmemesi gerektiğini çıkarabiliriz. Öyleyse hangi pervane ile esîr rüzgârı estireceğiz? Ya da gözlemci esîre göre olan hareketini nasıl tespit edecek?*

- Doğru bir çıkarım. Bir sorun daha var: Herhangi bir etki varsa dahi, bu etkinin gözlemci/esîr bağıl hızı ışık hızına göre önemsizken, küçük olması beklenir; çok az rüzgârda ses hızının çok az değişeceği gibi. Oysa 19. yüzyılda ulaşılabilen hızlar, ışık hızına göre çok küçüktü; ışık hızı saniyede 300.000 km iken, trenler saatte 100 km, yani yaklaşık saniyede 30 m mertebesinde hızlara çıkabiliyordu; bir top güllesi bile, saniyede 1 km civarında bir hıza sahipti...

- *Ölçüm düzeneğinin bir top güllesine nasıl yerleştirileceği ve ateşlemenin ivmesine nasıl dayanacağı da cabası...*

- İşte bu yüzden, astronomik bir hızın kullanılmasına karar verildi: Dünya'nın Güneş etrafındaki 30 km/sn'lik dönüş hızı. Bu bile ışık hızının ancak 10.000'de biridir, ancak eldeki en yüksek hız buydu. Eğer Güneş esîr içinde durağansa, dünya 30 km/sn'lik bir esîr

rüzgârının etkisinde olup, dünyanın gidiş yönünde ışık 10.000'de bir oranında hızlanıp, aksi yönde bu oranda yavaşlamalıydı—

- *Ya Güneş esîr içinde durağan değilse?*

- Önemli değil... Diyelim ki esîrin hızı, dünyanın 12 Ocak'taki hızına eşit olsun. O zaman, 12 Temmuz'da dünya, 60 km/s'lik bir esîr rüzgârına maruz kalır. Sonuç olarak, yıl boyu gözlem yapılırsa, Güneş Sistemi'nin esîre göre hareketinden bağımsız olarak, fark mutlaka algılanabilir.

Bu etkinin var olup olmadığını gözlemlemek için Amerikalı fizikçiler Michelson ve Morley, Michelson'ın geliştirdiği girişim ölçeri temel alan bir deney tasarladı. Bu deney, ışığın hızını değil, bu hızın değişik yönlerdeki farkını ölçebilecekti. Deney 1887'de yapıldı; sonuç sıfırdı. Yani ya esîr yoktu, ya da ışık üzerinde bir etkisi yoktu!

- *Deney 1887, Einstein'ın çalışması 1905. Neden bu gecikme?*

- Esîr öylesine benimsenmiş, öylesine "olmazsa olmaz" kabul ediliyordu ki, Michelson-Morley deneyinin olumsuz sonucunu açıklamak için İrlandalı FitzGerald ile Hollandalı ünlü matematiksel fizikçi Lorentz, hareketli cisimlere, gidiş yönlerinde esîrin baskı yaptığını ve cismin bu yöndeki boyutunun umdukları farkı yok etmeye yetecek oranda bir kısalmaya uğradığını ileri sürdüler.

- *Hani esîr hareketli cisimlere direnç göstermiyordu?*

- Değil mi? İşte esîrin çelişkili özelliklerine bir örnek... Einstein ise, Michelson-Morley deneyinden pek etkilenmişe benzemez (hatta ilgili makalesinde buna atıf bile yapmaz), ışık hızının gözlemciye göre değişmezliğine yukarıda bahsettiğimiz şekilde kendisi ulaşmıştır. Dönüşümün ve hareket yasalarının 3. Soru'da bahsettiğimiz gibi yeniden formüle edilmesinin en kısa yolu da, bu değişmezliğin kullanılmasıdır.

Tablo 2. Çeşitli hızlar için Lorentz faktörü γ'nın değerleri. Bu faktör 1'e ne kadar yakınsa, Einstein fiziği yerine Newton fiziği kullanmanın hatası o kadar az; 1'den ne kadar uzaksa da, hata o kadar fazladır. Işık hızının onda birinde hatanın yüzde bire yaklaştığını görebilirsiniz.

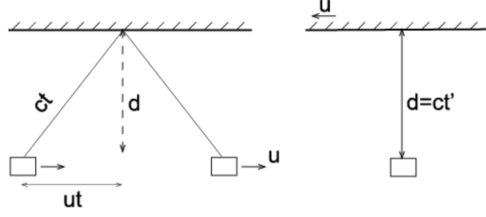
Yaklaşık neyin hızı olduğu	Hız (*u*) değeri	γ faktörü
Durağan cisim	0	1
Yürüyüş	1 m/s	1,000000000000000006
100 m koşucusu	10 m/s	1,0000000000000006

Formula 1 otomobili	100 m/s	1,00000000000006
Standart koşullarda ses	340 m/s	1,00000000000064
Tüfek mermisi	1000 m/s	1,000000000006
Dünya’dan kurtulma hızı	11,2 km/s	1,0000000007
Dünya’nın Güneş etrafındaki hızı	30 km/s = 0,0001 *c*	1,000000005
Güneş Sistemi’nin gökada etrafındaki hızı	200 km/s = 0,0007 *c*	1,00000022
	0,001 *c*	1,0000005
	0,01 *c*	1,00005
	0,05 *c*	1,0013
	0,1 *c*	1,0050
	0,2 *c*	1,02
	0,3 *c*	1,05
	0,4 *c*	1,09
	0,5 *c*	1,15
	0,6 *c*	1,25
	0,7 *c*	1,40
	0,8 *c*	1,67
	0,9 *c*	2,29
	0,95 *c*	3,2
	0,98 *c*	5,0
	0,99 *c*	7,1
	0,999 *c*	22
	0,9999 *c*	71
	0,99999 *c*	224
	0,999999 *c*	707
Tevatron hızlandırıcısında dolaşan bir proton	0,99999988 *c*	2050
CERN’in LHC hızlandırıcısında dolaşan bir proton	0,99999999 *c*	7100
En yüksek enerjili kozmik ışın protonları	0,99999999999999 9999999999 *c*	1.000.000.000.000
Işık ya da kütlesiz bir parçacık	*c*	∞

16-Zaman genleşmesi nedir? Hızlı giderek genç kalabilir miyim?

- *Işık hızının değişmezliğini nasıl kullanıyoruz?*

Şekil 17’de bir düşünce deneyi görüyorsun.



Şekil 17. Zaman genişlemesini gösteren düşünce deneyi.

- Düşünce deneyi ne demek?

- "Düşünce deneyi", Einstein tarafından yaygınlaştırılan bir kavram; gerçekten yapılması gerekmeden, bir önermenin sonuçlarını akıl yürütmelerle bulmak için düşünülen, mümkün olduğu kadar detaylardan arındırılarak, sorunun özünü ortaya çıkarmak için tasarlanan mizansenlere deniyor.

Bu düşünce deneyinde, sonsuz bir düzlem ayna ve ona paralel, *d* mesafesinde sabit *u* hızıyla hareket eden bir araç var. Bu araç, aynaya çok kısa bir ışık sinyali gönderiyor ve yönünü de, yansıyan sinyali tekrar yakalayabileceği şekilde ayarlıyor. Görelilik bize bu olayı istediğimiz eylemsiz sistemde inceleyebileceğimizi söylüyor, öyleyse birden fazla sistemde inceleyelim. Önce, aynanın durağan olduğu sistemde (sol taraf) düşünelim. Bu sistemde sinyalin aynaya gidiş süresine *t* dersek, bu sürede araç da *ut* kadar yol kat edeceğinden, dik üçgen (Pisagor) bağıntısından buluruz. $ct = \sqrt{d^2 + (ut)^2}$ Aracın durağan olduğu sistemde -ki bu sistemde ayna *u* hızıyla sola hareket etmektedir- sinyalin aynaya gidiş süresine *t'* dersek, c*t'*=*d* buluruz. Bundan da kolayca, şu bağıntı çıkarılabilir:



$$t' = t\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}} = \frac{t}{g}; \qquad g = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

Zaman genleşmesi:

Burada sağda γ (gamma) dediğimiz faktörün tanımı gösterilmiştir, bu faktör her zaman 1'den büyüktür. Bu denklemin anlamı ise şudur: Sinyalin yollanması ile alınması arasında araçta ölçülen zaman, aynanın sabit olduğu sistemde ölçülen zamandan γ misli kısadır! Buna **zaman genleşmesi** denir. Bir başka deyişle, **hareket eden bir sistemde, durağan sisteme göre zaman daha yavaş geçer.**

- *Böyle bir şey nasıl olabilir?*

- Görelilik ilkesinin, bir başka deyişle ışığın hızının değişmezliğinin kaçınılmaz sonucu... Bunu teyit eden ilk gözlemlerden biri, kozmik ışın müonlarının yer seviyesinde gözlemlenebilmesidir. Kozmik ışınlar, uzaydan gelen yüksek enerjili parçacıklardır ve bunlar dünya atmosferinin atomlarıyla çarpıştıklarında, çeşitli parçacıklar oluşur, bunların bazıları da müon denen parçacıklardır. Ancak bu müonlar kararsızdır ve yaklaşık iki mikrosaniyelik (µs) bir yarı-ömür ile bozunurlar. Zaman genleşmesi olmasaydı, bu süre içinde ışık hızı ile bile gitseler, ancak 600 m kadar[22] gidebilmeleri gerekirdi. Ama bu parçacıklar, 10.000 m civarında oluştukları halde, yer seviyesinde gözlemlenebilmektedir. Açıklama, zaman genleşmesi yüzünden müonlara göre iki mikrosaniye olan sürenin, büyükçe bir γ faktörüyle çarpılıp, bize göre en az 34-35 mikrosaniyeye çıkmasıdır.

22)2 µs × c = 2 ×10^{-6} s × 3 ×10^{8} m/s = 600 m

- *Yani ben şimdi hızla giden bir araca binsem, araçta zaman daha yavaş geçer, dolayısıyla ben daha yavaş mı yaşlanır, yani genç mi kalırım?*

- Genç kalmaktan ne anladığına bağlı. Diyelim ki ışık hızına yakın bir hızda giden bir uzay gemisindesin, öyle ki geminin hızının γ faktörü 100 olsun. (Tablo 2'de çeşitli hızlar için γ değerlerini bulabilirsin). Gemide zaman dünyaya göre 100 misli yavaş geçer, yani sen 100 ışıkyılı mesafedeki bir yıldıza gidip gelsen, dünyada 200 yıldan biraz fazla zaman geçer, ama sen iki yıldan azıcık fazla yaşlanırsın. Ama bu 200 yıl yaşayıp da genç kalmak şeklinde olmaz, zaman sana göre gerçekten iki yıldır. Tabii döndüğünde dünyayı çok değişmiş bulursun, torunlarının torunlarıyla karşılaşabilirsin. Çok büyük ve beklenmedik değişimler olması olasılığını anlatan bilimkurgu eserleri vardır, *Maymunlar Gezegeni* başta olmak üzere.

Hatırladığım bir başka öyküde de dünyaya döndüğünde tüm tanıdıkları yıllarca önce ölmüş bir uzay pilotu, babası yeni sefere çıkmış bir çocuğu evlat ediniyordu.

- *Yani ben genç kalmam, dünyadakiler yaşlanır...*

- Bir bakıma öyle... Bu γ faktörünün ne tarafa çalışacağını daha içselleştirebilmek için, **özzaman**[23] kavramını tanımlayalım. Bu, kabaca uzay gemisinde ölçülen zamandır. Daha dikkatli tanım şudur: İki olay arasındaki özzaman aralığı, bu iki olayın aynı noktada cereyan ettiği (aynı uzay koordinatlarına sahip olduğu) sistemde ölçülen zaman aralığıdır. Örneğin, bu olaylar, astronotun gemi sabahında yataktan kalkması ile gemi gecesinde tekrar yatması olsun. Geminin koordinat sisteminde, bu iki olay aynı noktada, astronotun yatağının koordinatlarında olmuştur, dolayısıyla ölçülen zaman aralığı özzaman aralığıdır. Halbuki bizim koordinat sisteminde ilk olay Dünya yörüngesinde, ikinci olay Neptün dolaylarında olmuş olabilir; bu yüzden bizim ölçtüğümüz zaman aralığı özzaman aralığı değildir.

23)İngilizce: Proper time, Almanca: Eigenzeit. Türkçede bazen **has zaman** da deniyor.

- *Bu tanımın bize faydası ne?*

- **Özzaman aralığı en kısa olandır.** Sonucumuz bununla tutarlı değilse, hata yapmış olduğumuzu kolayca anlarız. Ya da bizim sistemimizdeki zaman aralığından gemideki zaman aralığını hesaplamak istiyorsak, bu özzaman aralığı olacağından, bizimkinden küçük olacaktır; dolayısıyla γ ile çarpmayıp, **böleceğimizi** biliriz.

Bu γ faktörüne, ileride bahsedeceğimiz sebeplerden dolayı Lorentz faktörü de denir ve yine ileride anlayacağımız üzere, klasik mekanik (Newton yasaları ve/veya Galileo dönüşümleri) kullanırsak yapacağımız hata oranını kabaca verir. 4. Soru'da bahsettiğimiz, ışık hızının yüzde 5'i ile giden cisimler için hatamızın binde bir mertebesinde olduğu ve günlük hayatımızdaki hızlarda hatanın ihmal edilebilir olduğu, dolayısıyla Newton yasalarını kullanmanın pratikte bir sakıncası olmadığı yargılarına bu tabloyu (ya da γ'nın formülünü) kullanarak varabilirsin...

17-Hareket göreli olduğuna göre giden mi genç kalır, kalan mı? (İkizler çelişkisi/paradoksu)

- *Ama bir dakika... Madem görelilik var, ben uzay gemime binmiş hızla uzaklaşırken, kendimi durağan, dünyayı hızla benden uzaklaşıyor kabul edebilirim, hatta bu bakış açısı da en az dünyayı durağan kabul etmek kadar doğrudur, değil mi?*

- Evet, doğrudur ...

- *Ama ben durağansam ve dünya hareket ediyorsa, dünyadakiler benden yüz misli yavaş yaşlanacaklar demektir. Hani ben genç kalacaktım? Kim haklı? İkimiz birden haklı olamayız, değil mi? Kim genç kalacak?*

- Bir kere genç kalmak diye bir şey yok, senin zamanının kısa olması var. İkincisi, bu dediğine ikizler çelişkisi/paradoksu denir. Kısa cevap, biraz Nasrettin Hoca'nın fıkrasına benzeyecek ama, ikiniz de haklısınız.

Ama ben önce burada çelişki/paradoks ifadesinin kullanımını biraz açayım. Aslında özel görelilikte çelişki/paradoks yoktur. Ama konuştuğumuz zaman genleşmesi, konuşacağımız uzunluk büzülmesi gibi kavramlar günlük hayat deneyimlerimize çok ters gibi geldiğinden, insanlar bunları çeşitli şekillerde birleştirerek bize çelişki gibi gelen düşünce deneyleri oluşturmuşlardır. Ancak dikkatli incelenince bunlarda çelişki olmadığı, bir yerde özel göreliliğin bir bileşeninin ihmal edilmiş ya da atlanmış olduğu görülür.

Her neyse, ben ikizler "çelişkisi/paradoksu"nun standart ifade edilişini anlatayım... **İkiz kardeşlerden biri uzay gemisi ile gider, diğeri dünyada kalır. Kim daha gençtir?** Bu konu konuşulurken, kardeşlere çeşitli isimler konur, bazen A ve B, bazen Amy ve Bill vs. Ama ben hep hangisinin adı neydi diye karıştırdığımdan, -cinsel ayırımcılık yapıyor gibi görünme pahasına- betimleyici isimler kullanacağım: Kalanın adı Durmuş, gidenin adı Tayyar[24] olsun. Zaman genleşmesi yüzünden Durmuş'a göre Tayyar daha genç, Tayyar'a göre Durmuş daha genç.

24)Arapça kaynaklı bir isim; anlamı "uçan".



Şekil 18. İkizler çelişkisi/paradoksu. Kim daha genç? Çizim: Barış Mengütay

- *Bunda bir çelişki yok mu?*

- Bunun nasıl olabildiğini değişik seviyelerde ve şekillerde anlamak mümkün, bu konuya Lorentz dönüşümlerini ve özel görelilikte andaşlığı konuşurken tekrar döneceğiz. Ama şimdilik, ikisinin böyle düşünmelerinin, bir araya gelip, kendilerini karşılaştırmadıkça (Tayyar gittikçe uzaklaşıyor) sorun olmayacağını söyleyeyim.

- *Ya Tayyar yön değiştirip aynı hızla geri döner ve dünyaya inerse? O zaman kardeşiyle kucaklaştığında kim daha genç olacak? Hâlâ ikisi de diğerinin genç olduğunu iddia edemez, değil mi?*

- Bu da çelişkinin/paradoksun ikinci kısmı. Evet, bu durumda kesin bir yargı oluşması gerekir: Yaşları eşit mi, biri daha genç mi? Cevap: **Tayyar daha genç olur.** Çünkü Tayyar'ın dönüşü simetriyi bozmuştur; artık Durmuş ve Tayyar gözlemci olarak eşit haklara sahip değillerdir: Başka bir eylemsiz gözlemciye göre Durmuş tüm süreç boyunca sabit hızla gitmiştir, dolayısıyla koordinat sistemi eylemsizdir; Tayyar ise hız değiştirmiştir. Eğer bu değiştirme yavaş yavaş (yani matematisel olarak **sürekli** bir biçimde) olduysa, Tayyar'ın koordinat sistemi eylemsiz değildir. Eğer sabit hızla gidip aniden dönüş yapıp yine sabit hızla geri geldiyse, bir eylemsiz koordinat sisteminden bir diğerine atlamıştır. Farklı koordinat sistemlerinde yapılan ölçümler her zaman birleştirilemez. Örneğin, iki nokta arasındaki mesafeyi hesaplamak için bu noktaların koordinatlarını ölçmeye çalıştığımızı, ancak iki noktanın ölçümlerinin arasında koordinat sistemimizi 60° döndürdüğümüzü düşün. Bu koordinatların sayısal değerlerinden sağlıklı bir mesafe hesaplanabilir mi?

18-Uzunluk büzülmesi nedir? Enine büzülme var mıdır?

- *Demek zaman farklı algılanıyor, daha doğrusu ölçülüyor. Bu kadar mı?*

- Hayır. Hızın da bağıl olduğunu hatırla: Madem esîr ya da benzeri bir mutlak durağan koordinat sistemi yok, ancak bir cismin diğerine göre hareketinden bahsedebiliriz. Yani ben sana göre *u* hızıyla gidiyorsam, sen de bana göre *u* hızıyla gidiyorsundur; ama ters yönde. Şimdi γ faktörü 100 olan uzay gemisini hatırla ve gökadamızın merkezine doğru gittiğini düşün. Gemiye göre de gökadamız, aksi istikamette *u* hızıyla gitmektedir. Geminin kalkışı ile varışı arasındaki süreyi, gemidekiler bize göre 100 misli kısa ölçerler. Ancak, hız aynı olduğuna göre, bu sürede gökadanın gittiği mesafeyi de 100 misli kısa ölçmeleri gerekir. Kalkışta Güneş Sistemi, varışta da gökadanın belli bir yıldızı olduğuna göre, gökadamızı da geminin gidişi yönünde 100 misli büzülmüş olarak ölçerler:



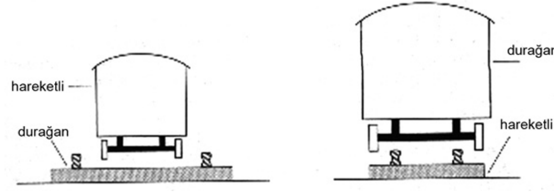
L¢= gL

Uzunluk büzülmesi:

Yani **hareketli bir cismin, örneğin bir uzay gemisinin uzunluğunu biz** γ **misli daha küçük ölçeriz.** Buna **FitzGerald-Lorentz büzülmesi** (genellikle kısaca **Lorentz büzülmesi**) de denir, çünkü Soru 15’te konuştuğumuz gibi bu bilimciler esîr rüzgârının baskısıyla böyle bir büzülme olabileceğinden bahsetmişlerdi. Andaşlık bağlamında buna tekrar değineceğiz.

- *Gidiş yönünde büzülme var da dik yönde niye yok? Bir diğer deyişle, Şekil 17’de sağdaki ve soldaki d’ler neden eşit?*

- Taylor ve Wheeler’in kitabında bunun nefis bir açıklaması var: Bir çift ray üzerinde giden ve γ faktörünün etkin olduğu hızlara çıkabilen bir tren düşün:



Şimdi diyelim ki enine büzülme olsun. O zaman, yer (ray) sisteminde ray aralığı sabit kalıp, tren hareket ederken aksı büzüleceğinden, tekerlekler rayların **içine** düşerek tren raydan çıkar. Halbuki olaya tren sisteminden bakarsak -ki görelilik ilkesine göre bu da aynı derecede geçerli bir bakış açısıdır- aks uzunluğu sabit kalıp, ray aralığı büzülmelidir. Bu da tekerlekler rayların **dışına** düşerek trenin raydan çıkması demektir ve ikizler "paradoksu"nun aksine, gerçek bir çelişkidir; tren hem içeri, hem dışarı düşemez.

- *Tabii çok benzer bir akıl yürütme ile enine büzülme yerine genleşme de olamaz. Öte yandan, boyuna büzülme ise treni raydan çıkarmaz...*

19-Özel görelilikte andaşlık nasıldır?

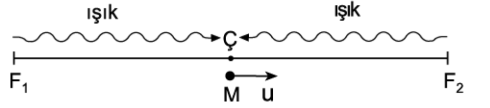
- *Zaman genleşmesi, uzunluk büzülmesi... Başka şaşırtıcı ne var?*

- Andaşlık konusu var. Yani iki olayın aynı anda olup olmadığı sorusu... Galileo/Newton fiziğinde iki olayın zamanlarının karşılaştırılması mutlaktır; ya birinci olay önce olmuştur, ya ikinci olay, ya da ikisi andaştır (eşzamanlı); bitti! Bir kere oluş sırası bulunduktan sonra, artık sorgulanmaz.

Özel görelilikte ise andaşlığın ne olduğunu biraz daha dikkatli düşünmek gerekiyor... En mantıklı yol, ışık sinyalleri aracılığıyla tanımlamak: Uzaysal olarak, iki olayın cereyan ettiği noktaların ortasında bulunan bir gözlemciye, iki olaydan yollanan ışık sinyalleri eşzamanlı olarak ulaşırsa, olaylar andaştır.

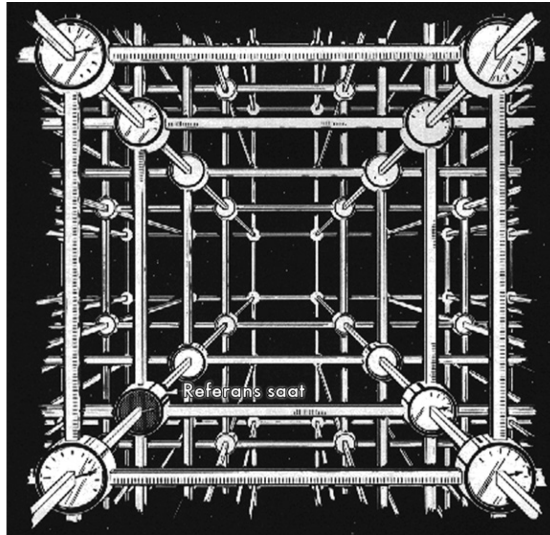
Şimdi yine bizim çoban ile makinisti düşünelim; trenin iki ucunda birer flaş olsun ve makinist trenin tam ortasında otursun. (Başka bir deyişle, kullandığı koordinat sisteminin orijini orada olsun.) Çobana

göre, tam onun makinistle yan yana geldiği anda trenin iki ucundaki flaşlar çaksın. (Şekil 20) Çoban, bu iki sinyali az sonra, ama eşzamanlı olarak alacağından, flaş çakma olaylarının (F_1 ve F_2) andaş olduğuna karar verebilecek, trenin uzunluğunu da bildiğinden, F_1 ve F_2'nin zamanını hesaplayabilecektir.



Şekil 20. Andaşlık görelidir.

Öte yandan makinist, F_2'den gelen sinyali F_1'den gelen sinyalden önce alacak, sinyallerin trenin iki ucundan, yani eşit mesafeden geldiğini bildiği için, F_2'nin zamanının F_1'in zamanından önce olduğuna karar verecektir! Zaman farkının trenin hızı ve uzunluğu ne kadar büyükse o kadar fazla olacağını görebilirsin...



Şekil 22. Taylor & Wheeler'in *Spacetime Physics* kitabından alınma çizimde, özel görelilikte ideal gözlemci görülüyor. Uzayı dolduran bir eşzamanlı saatler şebekesi, ana gözlemciye (referans saat) kendi yakın çevrelerindeki olayları raporlar. Ana saat, ağının merkezinde bekleyen bir örümcek gibi,

bütün bu bilgileri toplar ve tüm olayların konum ve zamanlarını belirler: Olayın zamanı zaten bildirilmiştir, konumunu da hangi saat tarafından bildirildiği belirlemiş olur.

- *Ama ne bir tren, bu etkilerin ölçülebileceği hızlara çıkabilir, ne de bizim çoban ile makinistte bu flaşların andaş olup olmadığını belirleyecek hassaslık olabilir...*

- Biraz idare et, bu bir düşünce deneyi. Gerçek dünyada ise örneğin tren yerine Güneş Sistemi (hatta bir yıldız kümesi) olup, gökadanın içinde hareket ediyor olabilir, çoban yerine gökadanın diğer yıldızları geçer, F_2 ve F_1'in de neler olacağı konusunda da sen hayal gücünü kullan! Sonuç olarak:

Bir gözlemciye göre andaş olan iki olay, bir diğerine göre andaş olmayabilir.

17. Soru'da konuştuğumuz ikizler "paradoksu"nda kardeşlerin, Tayyar uzaklaşırken birbirlerini daha genç olarak gözlemlemelerinin çelişki olmamasının anahtarı budur. Çünkü kimin daha genç olduğuna karar vermek için, iki kardeşi **aynı anda** karşılaştırmak gerekir; Durmuş'un aynı anda dediği olayları Tayyar aynı anda kabul etmez. Biraz daha somutlaştırmak gerekirse, yolculuğun başlangıcında kardeşler 20 yaşında olsunlar ve ikisi de kendi sistemlerinde doğum günlerini kutlasınlar. Bu kutlamalar birer olaydır ve hız uygun seçilirse, Durmuş, kendisinin 22. yaş günü kutlaması ile Tayyar'ın 21. yaş günü kutlamasını andaş olarak gözlemleyebilir. Ama bu, Tayyar'ın bu iki olayı andaş olarak gözlemleyeceği anlamına gelmez! O da, kendi 22. yaş günü kutlaması ile Durmuş'un 21. yaş günü kutlamasını andaş olarak gözlemleyecektir. Ancak ikizler tekrar buluşursa, yukarıdaki trenin uzunluğunun olmaması durumu gibi, kardeşler arasındaki gözlem farkları ortadan kalkar.

20- **Gözlemlemek ve görmek aynı şey midir?**

- *Bazen, iki olayın koordinatlarını aynı anda ölçmekten bahsediyoruz. Bir gözlemci farklı noktalarda aynı anda ölçüm yapabilir mi? Aynı anda iki*

yerde olamayacağına göre...

- Gözlemciyi bir noktada bekleyen bir insan (ya da başka bir akıllı varlık) olarak düşünürsen, haklısın; aynı anda olan olayları aynı anda göremez; çünkü ışığın hızı her ne kadar çok yüksekse de, sonsuz değildir; bir olaydan bize anında ışık sinyali gelemez.

- *Işık değil de başka bir şey gelse? Belki anında gelebilen bir şey vardır...*

- Hayır, yok ve bildiğimiz kadarıyla da olamaz. Çünkü ileride konuşacağımız gibi, bu görelilik ve nedensellik ilkelerinden birinin ihlali anlamına gelir. Anında sinyal alınamaması da, görülen cisimlerin görüntülerinin bozulmasına sebep olur.

- *Ne gibi?*

- Uzak yıldızlara baktığımızda onların bugünkü değil, yıllarca, belki binlerce yıl önceki hallerini gördüğümüz apaçık, değil mi?

- *Evet, bunu ben de düşünürüm zaman zaman...*

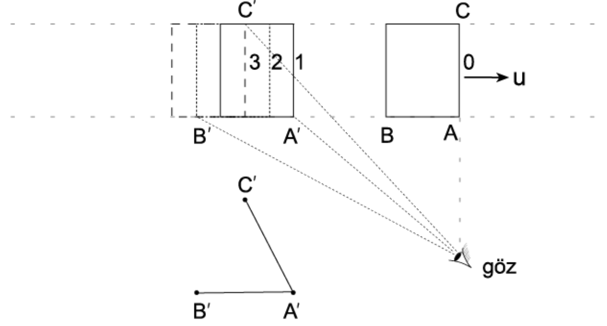
- Ama bu, her şey için geçerli! Sen benden yaklaşık 3 m mesafedesin, ben senin şu anki halini değil, yaklaşık 10 nanosaniye önceki halini görüyorum. (Tabii beynimin görüntü işleme ve algılama süresini hesaba katmazsam.) Bunun normalde fazla bir önemi yok, ama yeterince hızlı giden cisimler ya da yeterince hızlı süreçler için olacaktır. Örneğin hassas zaman ölçümlerinin yapıldığı deneylerde, ölçüm sinyalini ileten kabloların uzunluğu da hesaba katılır, çünkü kablolardaki elektrik sinyalleri de yaklaşık ışık hızıyla iletilir. Yine aynı sebepten, işlemcilerin daha küçük yapılabilmesi bilgisayarları hızlandıran etkilerden biridir.

- *Ya bizim sinyallerimiz, "işlemcilerimiz"?*

- Yavaş... Bizim sinirlerimizde, duyuları ya da hareket komutlarını ileten sinyaller, yaklaşık saniyede 100 m hızla taşınır. Yani avcumuza konacak bir şeyi algılayıp yakalama söz konusu olduğunda, sırf iletimden 20 milisaniye kadar kaybımız var. (İşte bundan ötürü trafikte öndeki araç ile yeteri kadar mesafe bırakmalıyız.) Ancak, beynimizin çalışma şeklinde hızdan çok, bağlantıların çokluğu ve esnekliği önemlidir.

Her neyse, sinyallerin anında gelmemesinin yol açacağı görüntü bozulmasından bahsediyorduk. Örnek olarak, Şekil 21'deki gibi küp şeklindeki bir cismin senin yanından gelip geçtiğini düşün. Küpten sana aynı anda gelen ışınlar, **küpün değişik noktalarından aynı**

anda çıkmamışlardır; dolayısıyla küpün belli bir andaki durumunu temsil etmezler; bu yüzden de küp yamuk görünür.



Şekil 21. Görmek, gözlemlemek değildir. Küpün boyu Lorentz büzülmesinden dolayı daha kısa görünmektedir. Önü 0 hizasına geldiği anda göze gelen ışınlar, küpten bu anda çıkmamışlar, hatta birbirlerinden de farklı anlarda çıkmışlardır. En uzak C noktasından gelen ışın en önce, küp 3 hizasındayken; B noktasından gelen ışın daha sonra; en yakın A noktasından gelen ışın en son, küp 1 hizasındayken yola çıkmıştır; dolayısıyla göz köşeleri A', B' ve C' yönlerinde görür. (Odaklamadan dolayı mesafe algılamasındaki değişiklikler hesaba katılmamıştır.)

Biz, gözlemci derken, bir yerde oturup, etrafına bakan bir kişiden değil, olan olayların konumlarını ve zamanlarını belirleyebilen bir varlıktan bahsediyoruz. Zaten Lorentz dönüşümleri de farklı gözlemcilerin aynı olay için belirledikleri koordinat ve zamanların birbirine dönüştürülmesidir; yani **aslolan gözleyen varlık değil, koordinat sistemidir.**

- *Işığın iletiminden kaynaklanan gecikmeleri hesaba katamaz mıyız?*

- Evet, bu koordinat/zaman belirlemelerini yapmanın bir yolu, bir noktada (örneğin orijinde) bekleyen bir kişisel gözlemcinin, gördüğü olaylar için, bu gecikmeleri hesaba katarak zaman belirlemesi olabilir. Ancak bu, kuramsal açıdan bir ek karmaşıklık getirir, ayrıca bir noktada bekleyen bir varlığın, uzaktaki olayların konumunu belirlemesi de hiç kolay değildir.[25]

25)Örneğin biz insanlar, iki gözümüzün farklı noktalardan bakması sayesinde derinlik algılarız. (Üç boyutlu film/fotoğraflar bir şekilde iki göze aynı farklılığa sahip görüntüler göstermek esasına dayanır.) Ancak epeyce uzaktaki nesneler için iki göz arasındaki mesafe derinliğin algılanmasına yetmez. Astrofizik ve evrenbilimde (kozmoloji) astronomik nesnelerin uzaklıklarının belirlenmesi en önemli gözlemsel sorundur.

- *Öyleyse?*

- Bir diğer yol ise, gözlemciyi “her yerde hazır ve nazır” kılmaktır. Biz fani varlıkların bunu başarabilmesi için de, özel görelilikte ideal gözlemci için Şekil 22’de gösterilen kuramsal model düşünülmüştür. Burada uzayı dolduran bir eşzamanlı saatler şebekesi görüyorsun—

- *Andaşlığı belirlemek bu kadar sorunken, bu saatleri nasıl eşzamanlı yapacağız?*

- Bir gözlemciye göre andaşlığı belirlemek o kadar sorun değil ki, farklı gözlemcilerin olayların andaşlığı üzerine anlaşamaması sorun. Buradaki eşzamanlılık ayarlamasını, özel görelilikteki birçok şey gibi ışık sinyalleriyle yapacağız. Şöyle ki, saatlerden biri “ana saat” olarak kabul edilir, bunu orijin olarak düşünebilirsin. “Ana saat”, her saate “Sana bir sinyal gönderiyorum, anında bana geri gönder” der. Sonra, sinyalin gidiş-geliş süresini ikiye bölüp, her saate ayrı ayrı “Aramızda şu kadar gecikme var, kendini ona göre ayarla” diye bildirir. Son olarak, ana saat tarafından saat başı sinyali gönderilince, her saat kendini saat başı+gecikme zamanı olarak ayarlar.

Her saat, yakın çevresini görür ve “Falan saatte filan olay oldu” diye ana saate düzenli raporlar gönderir. Ana saat (her saatin üstünde bir sıradan gözlemci düşünebilirsin tabii), ağının merkezinde bekleyen bir örümcek gibi, bütün bu bilgileri toplar ve tüm olayların konum ve zamanlarını belirler: Olayın zamanı zaten bildirilmiştir, konumunu da hangi saat tarafından bildirildiği belirlemiş olur.

Sonuç olarak, özel görelilikte “gözlemci” ifadesi, çoğu zaman “koordinat sistemi” ifadesiyle eşanlamlı olarak ya da Şekil 22’de anlatılan ideal gözlemci kastedilerek kullanılır. Bu iki anlam, tabii ki eşdeğerdir.

Ancak, ileride genel görelilikten bahsederken, eğri uzaylarda Şekil 22’deki gibi bir ideal gözlemci düşünmek zorlaşacaktır. Dolayısıyla genel görelilikte koordinat sistemi-gözlemci ayrımı net olarak yapılır ve hangisinin kastedildiği, açıkça söylenmediği durumlarda bağlamdan belli olur.

21- Özel görelilikte dönüşüm (Lorentz dönüşümü) nasıl yapılır? Galileo dönüşümünden temel farkı nedir?

- Üç ana sonucumuz var: Zaman genleşmesi, uzunluk büzülmesi, andaşlığın mutlak olmaması. İncelenecek bir örnekte bunları doğru şekilde birleştirmek zor olabilir gibi görünüyor. Zaten bir arkadaşım okuduğu popüler görelilik kitabındaki örneklerde nereden nereye ışık sinyalleri göndermenin uygun olacağını düşünmekten, cisimlerin büzülmelerini veya saatlerin yavaşlamalarını hesaba katmaya çalışmaktan başının ağrıdığını söylemişti. Bu işin sistematik bir yolu yok mu?

- Evet, var. Uzunluk, iki ucun konumu arasındaki farktır. Bir zaman süresi de iki olayın oluş zamanları arasındaki farktır. Sözünü ettiğin ilk iki şey, bu farkların iki farklı gözlemci tarafından yapılan ölçümlerinin birbirine dönüştürülmesi; andaşlık sorusu da zaten zaman farkı ile ilgili. Dolayısıyla, olayların **konum ve zamanlarının kendilerinin dönüşümleri** elimizde olursa, onlar da işimizi görür. 16., 18. ve 19. Sorularda konuştuklarımızı, bu dönüşümleri oluşturacak şekilde birleştirebiliriz:



Lorentz dönüşümleri:

$$x^T = \gamma\,(x^C - u\,t^C)$$

$$y^T = y^C$$

$$z^T = z^C$$

$$t^T = \gamma\,(t^C - u\,x^C/c^2)$$

Burada gözlemcilerin ilişkisi Şekil 15'teki gibi; yani *x* eksenleri çakıştırılıp T gözlemcisinin hareket yönüne çevrilmiş ve orijinler çakıştığı anda zamanlar sıfırlanmış. Yani hâlâ çoban ve makinist meseli çerçevesinde düşünebiliriz ve bu dönüşümler Galileo dönüşümlerinin (Soru 10) yerine geçer. Onlarla bir karşılaştır bakayım, ne fark görüyorsun?

- *Hımm... Onlar üç taneydi, bunlar dört...*

- En önemli farkın üstüne bastın, tebrikler... Şimdi zaman da dönüşüyor. Galileo zamanında zamanın mutlaklığı o derece sorgulanmaz kabul ediliyormuş ki, $y^T = y^C$ ve $z^T = z^C$ yazdıkları halde, $t^T = t^C$ yazmaya gerek bile görmemişler... Bu arada, dönüşümdeki γ faktörü, *u*'dan Soru 16'da verildiği gibi hesaplanan γ. Elimizde birden fazla hız varsa, γ'ları ayırt etmek gerekebilir—

- *Peki neden Einstein dönüşümleri denmiyor?*

- Çünkü bu dönüşümleri Einstein'dan önce, kendisine "Maxwell denklemlerine Galileo dönüşümleri uygulanınca değişiyorlar. Nasıl bir dönüşüm uygularsak değişmezler acaba?" sorusunu soran Lorentz bulmuş. Ama zamanın da dönüşmesi gerektiğini görünce, "Olmaz öyle şey" deyip bırakmış herhalde...

- *Öyleyse yalnız ışığın hızının her eylemsiz gözlemciye göre aynı olması kriteriyle geliştirilebilen bu dönüşümler, elektromanyetizmanın da her eylemsiz gözlemciye göre aynı olmasını sağlıyor... Siz optik yasalarının elektromanyetizma yasalarından üretilebildiğini söylemiştiniz. Acaba dönüşümün bu şaşırtıcı genelliği, daha da derin bir bağlantının, belki de elektromanyetizma yasalarının da optik yasalarından üretilebileceğinin işareti olabilir mi?*

- Hayır, elektromanyetizma ile optik eşdeğer değiller, elektromanyetizma daha geniş. Optik yasalarından değil ama, bir bakıma dönüşümlerden üretilebiliyor. Şöyle ki, grup kuramı kullanılarak, görelilik ilkesi ile uyumlu tüm alan kuramlarını bulmak mümkün. Tabii bu iş, Lorentz dönüşümlerinin matematiksel özellikleri kullanılarak yapılıyor ve görelilik ilkesi şu anda o kadar merkezi ki, **doğada yalnız böyle alanların bulunabileceği düşünülüyor** ve aksi de gözlemlenmedi. Bu alanların en basitleri, skaler alan dediklerimiz. Ama doğada şimdiye kadar böyle bir alan bulamadık.

Şimdiye kadar diyorum, çünkü CERN/LHC'de bulmayı umduğumuz Higgs parçacığı, bir skaler alana karşılık geliyor. İkinci basit tip ise vektör alanlar ve elektromanyetizma bunların en basit versiyonu.

- *Başka var mı?*

- Bir de spinör alanlar var, en basitleri spin-1/2 olmak üzere; bildiğimiz kadarıyla madde bunlardan oluşuyor; örneğin proton ve nötronların yapıtaşları olan kuarklar bu tip alanlarla ilgili, elektronlar da öyle. Ama alan kuramlarına ya da parçacık fiziğine şimdi girmeyelim, işimiz çok uzar.

- *Lorentz dönüşümlerindeki y ve z denklemleri, enine büzülme olmadığını gösteriyor, değil mi? Zaten Galileo dönüşümlerinde de bu denklemler aynı... Galileo dönüşümleri demişken, onlar düşük hızlarda hâlâ kullanılabilmeli, değil mi; 4. Soru'da konuştuğumuz gibi?*

- Evet ve evet. İkinci evet ile ilgili, Soru 16'daki γ tablosuna bakarsan, dünyada görebileceğimiz tüm hızlar için -kimi hızlandırıcılar içinde dolaşan bazı atomaltı parçacıklar hariç- γ'nın 1'e neredeyse ayırt edilemeyecek kadar yakın olduğunu görürsün. γ'yı 1'den ayırt edemiyorsak, Lorentz dönüşümlerinin ilk üç denklemi, Galileo dönüşümleri haline gelir. (Yukarıdaki denklemlere bak.) Bu da, 4. Soru'da bahsettiğimiz, yeninin eskiyi içermesi özelliğinin bir örneği.

- *Işık hızı değişmezliğinden çıkardığımız üç ana sonucu, Lorentz dönüşümlerinden nasıl görebiliriz?*

- Dört işlemi kullanarak!

Zaman genleşmesi ile başlayalım. Hedefimiz, trendeki bir zaman dilimi T^T için çobanın ölçeceği T^C zaman aralığını bulmak. Bu zaman dilimi bir olay ile başlayıp bitmeli; bu iki olay, makinistin bir kronometreyi başlatması ve durdurması olabilir. Önemli nokta şu: Bu iki olayın trendeki koordinatları aynı, dolayısıyla x^T değerleri eşit. Dönüşümü, yalnızca bu bilgi ile kullanarak, $T^C = \gamma T^T$ bulabiliriz.[26]

[26])Meraklısına: Her iki olay için $x^T = \gamma\,(x^C - ut^C)$ yazıp taraf tarafa çıkararak x^C'lerin farkını uT^C olarak buluruz. Sonra yine her iki olay için $t^T = \gamma(t^C - ux^C/c^2)$ yazıp taraf tarafa çıkarırsak $T^T = \gamma(T^C - u^2T^C/c^2) = T^C/\gamma$ buluruz.

Uzunluk büzülmesine gelelim: Trenin kendi sisteminde ölçülen uzunluğuna L^T, çobanın ölçtüğü uzunluğuna L^C diyelim. Uzunluk, trenin iki ucunun koordinatlarının **aynı anda** ölçülüp, farkının alınmasıyla bulunur.

- *Ama makinistin andaş dediği olaylara, çoban andaş demiyor...*

- $L^T = \gamma L^C$ ilişkisini, dönüşümü makinistin sisteminde trenin önü ve arkasının durağan olduğu gerçeğiyle birlikte kullanarak bulabiliriz.[27]

27)Makinistin sisteminin orijini, trenin arka ucunda olsun. Bu durumda trenin arkası $x^T = 0$ da, önü ise $x^T = L^T$ de durmaktadır. Dönüşümün ilk denklemini trenin arkasına uygularsak, burası için $x^C = ut$ buluruz. Bu gayet doğaldır, çünkü çobana göre, tren sabit u hızıyla gittiğine göre, t zamanında gittiği mesafe ut olur. Dönüşümü öne uygularsak, $L^T = \gamma(x^C - u\, t^C)$ yazmamız gerekir, buradan trenin önü için $x^C = ut + L^T/\gamma$ buluruz; yani trenin önü arkasından L^T/γ kadar ileridedir, dolayısıyla çobana göre trenin uzunluğu L^C, buna eşittir.

Burada da bir **öz uzunluk**[28] tanımlayabiliriz; bir cisim söz konusu olduğunda, bu cismin kendisi üzerinde ölçülen uzunluğudur. Daha genel tanım şudur: İki olay arasındaki öz uzay aralığı, bu iki olayın aynı anda cereyan ettiği sistemde ölçülen uzay aralığıdır.

28)İngilizce: Proper length, Almanca: Eigenlänge.

- *Bu tanımın bize faydası ne?*

- **Öz uzunluk, en uzun olan uzay aralığıdır**. Sonucumuz bununla tutarlı değilse, hata yapmış olduğumuzu kolayca anlarız. Ya da bizim sistemimizdeki uzunluktan trendeki ya da uzay gemisindeki uzunluğu hesaplamak istiyorsak, bu öz uzunluk olacağından, bizimkinden büyük olacaktır, dolayısıyla γ'ya ile bölmeyip, **çarpacağımızı** biliriz.

22-Uzay-zaman nedir?

- *Bu dönüşümlere göre, bir gözlemcinin gözlemlediği uzay koordinatını hesaplamak için bir başka gözlemcinin gözlemlediği uzay koordinatını ve zamanı kullanıyoruz. Yani uzay ve zaman, bir anlamda birbirine dönüşmüyor mu?*

- İşte bu yüzden, bu noktadan sonra ayrı ayrı uzay ve zamandan değil, uzay-zaman dediğimiz bir bütünlükten bahsediyoruz. Zaman da bu durumda dördüncü koordinat rolünü oynuyor. Tüm fiziksel büyüklükleri matematiksel olarak bu dört boyutlu uzay-zaman içinde düşünmek mümkün; örneğin vektör büyüklükleri dört boyutlu olarak genelleştirebiliyoruz. Hatta, özel görelilikteki bazı bağıntılar dört boyutta, üç boyutta olduğundan daha basit yazılabiliyorlar.

- *Yani bazen biraz daha matematik, aslında daha az matematik anlamına geliyor, öyle mi?*

- Evet, uzaya bir dördüncü boyut eklemek gibi devrimsel bir matematik kavramını kullanmaya başlayınca, aslında özel göreliliğin matematiği basitleşiyor. Genel göreliliğe gelince, uzay-zaman kavramı tamamen vazgeçilmez hale geliyor.

- *Sanırım artık uzay-zamanı tanımlamaya hazırız...*

- Uzay-zaman, olabilecek tüm olayları içinde barındıran, dört boyutlu, matematiksel olarak sürekli bir yapıdır.

- *"Dört boyutlu" tam olarak ne demek?*

- Uzay-zamanın herhangi iki noktasını, yani herhangi iki olayı ayırt etmek için en fazla dört rakama ihtiyacın var demek.

- *"Sürekli" tam olarak ne demek?*

- Herhangi iki noktanın arasında başka bir nokta bulunabilir demek. 1 ve 2 rakamları arasında 1,5, 1 ve 1,5 arasında 1,25, 1 ve 1,25 rakamları arasında 1,125 bulunması ve bunun sonsuza kadar devam ettirilebilmesi gibi.

- *Yukarıda bahsettiğiniz "dört boyutta daha az matematik" konusunda, bu noktada anlayabileceğimiz bir örnek verebilir misiniz?*

- Newton'un birinci yasasını hatırlıyor musun?

- *Hani Galileo'nun bulduğu... Eylemsizlik ilkesi...*

- Evet. Onun üç boyuttaki ifadesi, "Üzerine kuvvet etki etmeyen cisimler bir doğru boyunca sabit hızla hareket ederler" şeklindeydi, değil mi? Dört boyutta bunu yalnızca "Üzerine kuvvet etki etmeyen cisimler bir doğru boyunca hareket ederler" şeklinde ifade edebiliriz. Sonuçta, dört boyuttaki bir doğru, üç uzay koordinatının dördüncü koordinat olan zaman ile düzgün arttığı bilgisini içerir.

- *İlginç... Peki, uzay-zamanın dört boyutlu olduğundan ne kadar eminiz?*

- **En az** dört boyutlu olduğundan eminiz. Ama henüz gözlemleyemediğimiz ek boyutlar olabilir. Burada iki yaklaşım var: Birinci yaklaşım, bu ek boyutları hiçbir zaman geometrik olarak gözlemleyemeyeceğimiz halde, bu boyutlarla ilgili etkilerin bilinen bağımsız bir etkileşime (örneğin elektromanyetizmaya) eşdeğer olabileceği. Bu durumda, bu etkileşimin geometrize edildiği söylenir. İkinci yaklaşım ise, bu boyutların gelecekte ya geometrik olarak ya da henüz bilmediğimiz etkileşimler şeklinde gözlemlenebilecek olması. Örneğin uzay-zamanın ek bir boyuttaki "derinliği" henüz gözlemleyemeyeceğimiz kadar küçük olabilir. (Cetvelin hassas değilse, bir kâğıdın kalınlığını ölçemeyip, kâğıdı iki boyutlu bir cisim olarak düşünebileceğin gibi.)

- *Bu tür kuramlar için örnek?*

- İlk "ek-boyutlu" kuram, Kaluza-Klein kuramları dediğimiz grubun ilk örneğiydi ve elektromanyetizmayı geometrize etmeyi hedefliyordu. En son örnekleri ise, tüm etkileşimleri birleştirme iddiasındaki süpersicim kuramları. Bu kuramlarda uzay-zamanın boyutları 26'ya kadar çıkıyor... Ancak bunların öngörülerini sınayacak deneyler henüz yapılamıyor.

23-Zaman nedir?

- *Peki, uzay-zaman bildiğimiz kadarıyla dört boyutlu ve zaman dört boyuttan yalnızca biri. Ama bu dört boyut tamamen eşdeğer mi?*

- Aslında tam olarak değil...

- *Nedir zamanı farklı yapan? Bir diğer deyişle: Zaman nedir?*

- Zaman nedir? Binlerce yıldır filozoflar, ilahiyatçılar, edebiyatçılar, bilimciler bu soru üzerine kafa patlatmışlar, çeşitli tanımlar yapmaya çalışmışlar; bir internet taramasıyla[29] bunlara ulaşabilirsin. Ben yalnızca iki fizikçinin söylediklerini aktarayım: 2. Dünya Savaşı sonrasının belki de en önemli fizikçisi Richard Feynman: "Zaman her şey durduğunda devam edendir"; onun hocası John Wheeler: "Zaman, her şeyin aynı anda olmasını engelleyendir" demiş...

29)Örnek arama ifadesi: “quotes about time.”

Benim bu soruya verebileceğim kendimce en uygun (yani hem doğru olan, hem de metafiziksel ya da kısırdöngü olmayan) cevap şu: **Zaman, öyle bir boyuttur ki, o boyutta ilerlememek elimizde değildir.**

Yani *x, y, z* boyutlarını düşün. Bu boyutlarda yer değiştirmek bizim tercihimize bağlı; şu sandalyeden istersem kalkıp ister doğu yönüne gidebilirim, ister kuzey; istersem yukarı zıplayabilirim. Ama zaman yönünde gitmemek, ya da geri gitmek elimde değil, ileri gitmek zorundayız.

- *Ama bu pek bir şeyi açıklamıyor. Neden o boyutta ilerlemek zorundayız? Bunu merak ediyorum...*

- Her türlü kavramın açıklaması, başka kavramlara bağlı olmak zorundadır. Soru, açıklaya açıklaya nerede duracağındır. Durduğun yer ya bir temel yasadır ya da aksiyom/postulattır. Benim tanımım, yaşadığımız uzay-zaman ve bizim onun içinde varoluş şeklimiz hakkında bir postulat. Kısacası, “evrenimiz böyle” diyebilirsin...

- *Birincisi, uzay-zaman dediniz, ama zamanı tanımlamaya çalışıyordunuz; döngüsel bir tanım oldu.*

- Bir önceki soruda verdiğim uzay-zaman tanımında zamanı kullanmadım ki... Ona uzay-zaman dememizin sebebi, uzay ve zaman kavramlarının önceden kafamızda varolup, tanımlamaya çalıştığımız şeyin de bunları içermesi. Ama “Olabilecek tüm olayları içinde barındıran, dört boyutlu, matematiksel olarak sürekli yapıya” başka bir isim verilebilir, örneğin -tamamen şimdi uyduruyorum-, “varova.” Neden bu isim olmasın, yalnızca olaylardan bahsediyorum. Sonra da zamanı yukarıdaki gibi tanımlayabilirim... İkincisi?

- *İkincisi, “ilerlemek” ifadesi zaten zaman referansı içermiyor mu?*

- Evet, burada biraz zayıflık var gibi, değil mi? Peki, şöyle diyelim: Bir kişinin/gözlemcinin/parçacığın dahil olduğu olayların (bizim evrenimizde) en fazla üç koordinatı aynı olabilir, dördüncüsü farklı olmak zorundadır. İşte bu dördüncüye zaman denilebilir ve bir kişinin/gözlemcinin/parçacığın dahil olduğu olaylar bu koordinata göre sıralanabilir...

- *Biraz düşüneyim... Ayrıca, zaman ve uzay boyutları arasındaki bu farkı lafla söylemek yetmez herhalde, bu ifadenin bir matematiksel karşılığı*

olmalı...

- Var, şöyle ki: Lorentz dönüşümlerini, dört boyutlu uzay-zamanda bir koordinat dönüşümü olarak yorumluyoruz. Ancak koordinat dönüşümleri bazı özelliklere sahiptir, bunlardan birisi de vektörlerin iç çarpımlarını değiştirmemektir. Dönüşüm incelenince görüyoruz ki, dört boyutlu vektörlerin uzay bileşenlerinin iç çarpıma katkısı pozitif, zaman bileşeninin katkısı negatif. Bu iki noktayı ("olayı") ayıran dört boyutlu vektör için de geçerli, yani iki nokta birbirinden *x* yönünde *X* kadar, *y* yönünde *Y* kadar... ayrılmışsa, bunları bağlayan vektörün kendiyle iç çarpımı $X^2 + Y^2 + Z^2 - c^2T^2$ ile veriliyor; biz de "Zaman yönünde metrik katsayısı negatiftir" diyoruz.

- *Bir diğer deyişle, "aralığın karesinin" negatif olduğu bir yöne zaman diyebiliriz... Peki, cisimlerin zaman yönünde gitmeleri gerektiği matematiksel olarak nasıl ifade ediliyor?*

- Onun için de şu kuralı kullanıyoruz: Cisimler, yörüngeleri üzerindeki yakın noktalarının "aralıklarının karesi" negatif olacak şekilde, uzay-zamanda hareket ederler. (Yine bizim evrenimizde.)

- *"Evrenimiz böyle" diye kesip atmak, kolaycılık olmuyor mu?*

- Peki, daha öteye nasıl gitmeyi önerirsin ki? Hem, bilim, doğa yasalarının incelenmesidir. Doğa yasaları da bir anlamda, evrenimizin özellikleridir. Dolayısıyla "evrenimizin filanca özelliği vardır" demek, uygundur. Ancak, evrenimizi mümkün olduğu kadar az özellik cinsinden anlamaya çalışırız ("Occam usturası"nı anımsa) ve hatta evrenimizin nispeten az sayıda yasa ile anlaşılabileceğine inanırız; şu anda üç.

- *Neden? Yani neden 357 tane yasa olmasın?*

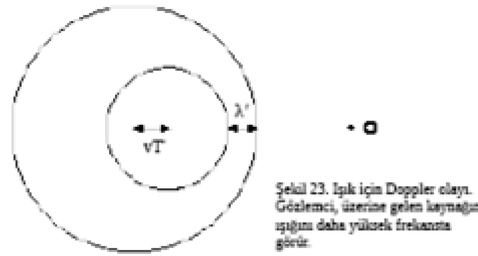
- Bilmem... Belki de 357 tane yasa olan bir evrende bilim yapmak nerdeyse imkânsız olacağı için. Bir etkileşimi kontrollü olarak incelemek için 356 etkileşimi elimine edecek bir deney tasarlamak gerekecekti çünkü. Ya da Tanrıya inanıyorsan, bir arkadaşımın vaktiyle söylediği "Tanrı, yalnızca kendisinin anlayabileceği bir evren yaratacak kadar bencil olamaz" sözü üzerine düşünmek isteyebilirsin...

- *Yani siz, evrenimizdeki fiziğin neredeyse olabileceklerin en basiti olduğunu mu söylemek istiyorsunuz ?*

- Öyle. Aynen öyle...
- *Arkadaşlarım buna pek katılamayacaklar ama... Anlıyorum galiba...*

24-Özel görelilikte hızlar nasıl dönüşür?

- *Bu derin konuları bırakıp daha somut şeylere dönsek*

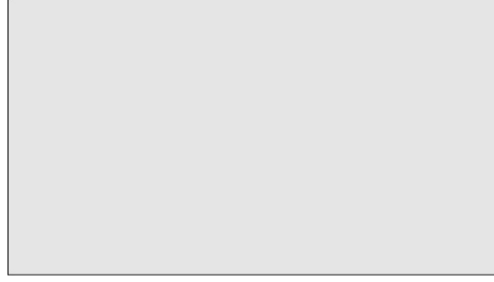


Şekil 23. Işık için Doppler olayı. Gözlemci, üzerine gelen kaynağın ışığını daha yüksek frekansta görür.

mi acaba... Galileo dönüşümlerini yazar yazmaz, hız bileşenlerini nasıl etkilediklerine bakmıştık; Lorentz dönüşümleri için de bunu yapacağız herhalde. İlginç olmalı, çünkü ışık hızı gözlemciye göre değişmediğine göre, $v^C = v^T + u$ *olamaz..*

- Gözlenen cismin de hızı sabit olsa, şimdi vereceğim hız dönüşüm formülleri biraz dikkat ile çıkartılabilir; ama genellikle gözlenen cisimler sabit hızla gitmez; bu yüzden, dönüşüm ancak diferansiyeller kullanılarak çıkartılabilir:[30]

30)Yüksek matematik bilenler için: Hızın x bileşeninin $x(t)$'nin türevi olduğunu hatırlayalım. Bu aynı zamanda x ve t'deki küçük değişimlerin, yani x ve t'nin diferansiyellerinin oranıdır: $v^T_x = dx^T/dt^T$ olarak da yazabiliriz. Lorentz dönüşümlerinin ilk denkleminden $dx^T = \gamma(dx^C - udt^C)$, son denkleminden $dt^T = \gamma(dt^C - udx^C/c^2)$ yazıp, bunları dx^T/dt kesirinde yerine koyalım. Kesirin pay ve paydasını dt^C'ye bölüp $v^C_x = dx^C/dt^C$ bağıntısını da kullanarak, hızın x bileşeninin dönüşümünü buluruz. Dik bileşenlerin dönüşümü de benzer şekilde bulunur.



$$v_x^T = \frac{v_x^C - u}{1 - \frac{u v_x^C}{c^2}}$$

$$v_y^T = \frac{v_y^C}{g(1 - \frac{u v_x^C}{c^2})}$$

$$v_z^T = \frac{v_z^C}{g(1 - \frac{u v_x^C}{c^2})}$$

Lorentz dönüşümlerinin
hız bileşenlerine etkisi:

- *Bunlar biraz karışık görünüyor...*
- Evet ve senin dediğin gibi, hızın tamamen raylara paralel olduğu durumdaki ters dönüşüm $v^C = v^T + u$ değil, - Bu formüle bazen "Özel görelilikte hızların

toplanması formülü" denir ama, bu ibare aritmetik toplamayı akla getirdiği için buna "hızların birleştirilmesi" formülü diyebiliriz; yahut da toplamayı, örneğin u⊕v şeklinde gösterebiliriz. Sonuçta tren 0,5 *c* hızıyla gitse ve makinist öne doğru (kendine göre) 0,5 *c* hızıyla bir roket fırlatsa, çoban bu roketi *c* hızında **ölçmez**. Hangi hızda ölçer?
- *0,8 c.*

Formüllerle aran çok iyi değilse, Tablo 3, 4 ve 5'de dönüşümün bazı uygulamalarını görebilirsin. Tablo 3'de[31] v_X ve *u*'nun (m/s cinsinden) ışık hızına göre küçük (en yüksek değeri ışık hızının yaklaşık yüzde üçü olan) değerleri için dönüşmüş hız değerleri var.

31)Bu dönüşüm aslında daha geneldir; bize göre *u* hızıyla giden bir gözlemcinin, *x* bileşenini v_X olarak gözlemlediği hız için bizim gözlemleyeceğimiz *x* bileşenlerini göstermektedir. Burada bizim ve diğer gözlemcinin koordinat sistemlerimiz, *x* eksenleri *u* hızının yönüyle çakışacak şekilde döndürülmüştür.

v_x u	1	10	100	1000	10.000	100.000	1.000.000	10.000.000
1	2	11	101	1001	10.001	100.001	1.000.001	10.000.001
10	11	20	110	1.010	10.010	100.010	1.000.010	10.000.010
100	101	110	200	1.100	10.100	100.100	1.000.100	10.000.100
1.000	1.001	1.010	1.100	2.000	11.000	101.000	1.001.000	10.000.999
10.000	10.001	10.010	10.100	11.000	20.000	110.000	1.010.000	10.009.989
100.000	100.001	100.010	100.100	101.000	110.000	200.000	1.099.999	10.099.888
1.000.000	1.000.001	10.00.010	1000.100	1.001.000	1.010.000	1.099.999	1.999.978	10.998.778
10.000.000	10.000.001	10.000.010	10000100	10.000.999	10.009.989	10.099.888	10.998.778	19.977.802

Tablo 3. *u* hızıyla giden bir araçtan, öne doğru v_x hızıyla bir mermi atılırsa, biz merminin hızını ne olarak ölçeriz? Tablo, çeşitli (*c*'den epey küçük) *u* ve v_x değerleri için cevapları gösteriyor. (Newton fiziğine göre bu hızlar toplanır.) Bu tabloda hızlar m/s cinsinden verilmiştir. Biliyoruz ki hızlar ne kadar küçükse, Einstein fiziği yerine Newton fiziği kullanmanın hatası o kadar az; ışık hızına ne kadar yakınsa da, hata o kadar fazladır. Bu tablodaki değerler için, dönüşümün basit toplamaya çok yakın, bazen ayırt edilemeyecek denli yakın sonuçlar verdiğini görebiliriz; Tablo 4 ve Tablo 5 ile karşılaştırınız.

Bu tablodan, bu değerler için, dönüşümün basit toplamaya çok yakın, bazen ayırt edilemeyecek denli yakın sonuçlar verdiğini görebilirsin.

- *Ve bu da 4. Soru'da konuştuklarımızla tutarlı...*

- Tablo 4'de[31] ise, v_x ve *u*'nun daha büyük bazı pozitif değerleri için dönüşmüş hız değerleri var. Bu tabloda hızlar ışık hızı (*c*) cinsinden. Burada *u*'yu *c* olarak alamıyoruz (neden?), o yüzden son sütunun tepesi 1,0 değil.

- *Evet, u'yu neden c olarak alamadığımızı anlıyorum. Son satır da ışık hızının tüm gözlemcilere göre c olduğunu gösteriyor.*

v_x u	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,999
0,0	0,0000	0,1000	0,2000	0,3000	0,4000	0,5000	0,6000	0,7000	0,8000	0,9000	0,9990
0,1	0,1000	0,1980	0,2941	0,3883	0,4808	0,5714	0,6604	0,7477	0,8333	0,9174	0,9992
0,2	0,2000	0,2941	0,3846	0,4717	0,5556	0,6364	0,7143	0,7895	0,8621	0,9322	0,9993
0,3	0,3000	0,3883	0,4717	0,5505	0,6250	0,6957	0,7627	0,8264	0,8871	0,9449	0,9995
0,4	0,4000	0,4808	0,5556	0,6250	0,6897	0,7500	0,8065	0,8594	0,9091	0,9559	0,9996
0,5	0,5000	0,5714	0,6364	0,6957	0,7500	0,8000	0,8462	0,8889	0,9286	0,9655	0,9997
0,6	0,6000	0,6604	0,7143	0,7627	0,8065	0,8462	0,8824	0,9155	0,9459	0,9740	0,9997
0,7	0,7000	0,7477	0,7895	0,8264	0,8594	0,8889	0,9155	0,9396	0,9615	0,9816	0,9998

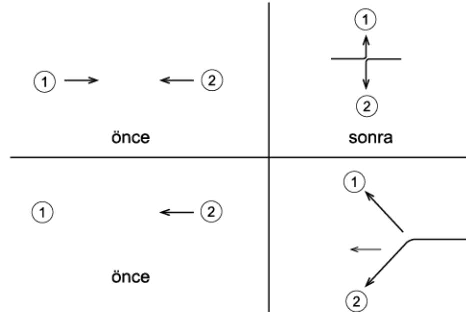
Tablo 4. *u* hızıyla giden bir araçtan, öne doğru v_x hızıyla bir mermi atılırsa, biz merminin

0,8	0,8000	0,8333	0,8621	0,8871	0,9091	0,9286	0,9459	0,9615	0,9756	0,9884	0,9999
0,9	0,9000	0,9174	0,9322	0,9449	0,9559	0,9655	0,9740	0,9816	0,9884	0,9945	0,9999
1,0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

hızını ne olarak ölçeriz? Tablo, *c*'nin hatırı sayılır kesirleri olan çeşitli u ve v_x değerleri için cevapları gösteriyor. (Newton fiziğine göre bu hızlar toplanır.) Bu tabloda hızlar *c* cinsinden verilmiştir. (Yani örneğin 0,2, ışık hızının yüzde 20'si demektir.) Biliyoruz ki hızlar ne kadar küçükse, Einstein fiziği yerine Newton fiziği kullanmanın hatası o kadar az, ışık hızına ne kadar yakınsa da hata o kadar fazladır. Bu tablodaki değerler için (sol üstteki üç değer hariç), dönüşümün basit toplamadan farklı sonuçlar verdiğini görebiliriz; Tablo 3 ve Tablo 5 ile karşılaştırınız.

Tablo 5'de[31] de büyük ve negatif v_x değerleri için dönüşmüş hız değerleri var. v_x ve u yine ışık hızı (c) cinsinden.

Tablolar, *x* yani paralel bileşenlerin dönüşümünü gösteriyor. Ayrıca dikkat et, dik yönde (enine) büzülme olmamasına rağmen, hızın dik bileşenleri dönüşümde değişime uğruyor. Çünkü, zaman da dönüşüyor...



$m\vec{v}$ Şekil 24. Momentum olamaz. Üstte: Eşit kütleli iki cisim, eşit hızlarla elastik olarak çarpışıp, 90'ar derece yön değiştiriyor. Altta: Aynı olayın, soldaki cismin durağan olduğu koordinat sistemindeki görünüşü. Alttaki hızlar, üstteki eşdeğer hızların *u* = *v* ile dönüştürülmesi ile elde edilir; "sonra" kısmındaki yatay bileşen -*v*'dir. $m\vec{v}$ büyüklüğüne bakarsak, altta, yatay bileşeninin soldaki (önce) değeri $\frac{-2mv}{1+v^2/c^2}$, sağdaki (sonra) değeri ise -2*mv*, yani korunmuyor.

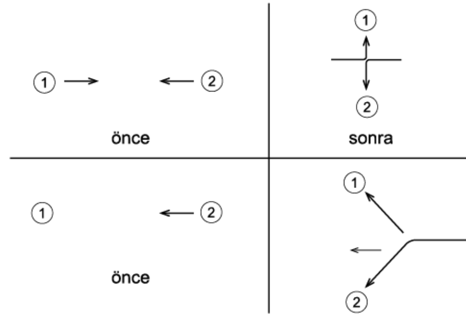
25-Hareketli bir kaynağın yaydığı ışığın frekansını (yani rengini) nasıl görürüm?

- *Peki, ışığın hızı gözlemciye göre değişmiyor. Hiç değişen bir şeyi yok mu?*

- Frekansı (ya da eşdeğer olarak dalga boyu) değişiyor. Doppler olayını duymuş muydun?

- *Evet, dalga kaynağı ya da alıcı hareket edince, frekans farklı algılanıyordu...*

- Bu, ışık için de geçerli. Şekil 23, O gözlemcisine doğru *v* hızıyla hareket eden ve şu anda bir dalga atması yollamakta olan bir kaynağın bir ve iki periyot önce yolladığı



$m\vec{v}$ Şekil 24. Momentum olamaz. Üstte: Eşit kütleli iki cisim, eşit hızlarla elastik olarak çarpışıp, 90'ar derece yön değiştiriyor. Altta: Aynı olayın, soldaki cismin durağan olduğu koordinat sistemindeki görünüşü. Alttaki hızlar, üstteki eşdeğer hızların $u = v$ ile dönüştürülmesi ile elde edilir; "sonra" kısmındaki yatay bileşen -*v*'dir. $m\vec{v}$ büyüklüğüne bakarsak, altta, yatay bileşeninin soldaki (önce) değeri $\frac{-2mv}{1+v^2/c^2}$, sağdaki (sonra) değeri ise -2*mv*, yani korunmuyor.

dalga atmalarını gösteriyor. O'nun göreceği dalga boyu λ' ve O'nun koordinat sisteminde kaynağın periyodu *T'* ile gösterilmiş. λ' 'nın orijinal dalga boyundan kısa olduğu şekilden görülebiliyor. İncelenirse, O'nun gözlediği frekans şöyle bulunur:[32]

32)Çıkarım için şekle bakın: İki periyot önce çıkan dalganın gittiği mesafe $2cT' = vT' + cT' + \lambda'$ ile verilir. Buradan $\lambda' = (c-v)T'$ bulunur. Zaman genleşmesinden $T' = \gamma T$, ayrıca standart dalga ilişkilerinden $\lambda' = c / f'$ ve $T = 1 / f$ bağıntılarını kullanarak, *f'* frekansını *f* cinsinden buluruz.

Tablo 5. *u* hızıyla giden bir araçtan, arkaya doğru -v_x hızıyla bir mermi atılırsa, biz merminin hızını ne olarak ölçeriz? Tablo, *c*'nin hatırı sayılır kesirleri olan çeşitli *u* ve v_x değerleri için cevapları gösteriyor. (Newton fiziğine göre bu hızlar toplanır.) Bu tabloda hızlar c cinsinden verilmiştir. (Yani örneğin 0,2, ışık hızının yüzde 20'si demektir.) Biliyoruz ki hızlar ne kadar küçükse, Einstein fiziği yerine Newton fiziği kullanmanın hatası o kadar az; ışık hızına ne kadar yakınsa da, hata o kadar

fazladır. Bu tablodaki değerlerin çoğu için dönüşümün basit toplamadan farklı sonuçlar verdiğini görebiliriz.

vx u	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9999
0,0	0,0000	0,1000	0,2000	0,3000	0,4000	0,5000	0,6000	0,7000	0,8000	0,9000	0,9999
-0,1	-0,1000	0,0000	0,1020	0,2062	0,3125	0,4211	0,5319	0,6452	0,7609	0,8791	0,9999
-0,2	-0,2000	-0,1020	0,0000	0,1064	0,2174	0,3333	0,4545	0,5814	0,7143	0,8537	0,9999
-0,3	-0,3000	-0,2062	-0,1064	0,0000	0,1136	0,2353	0,3659	0,5063	0,6579	0,8219	0,9998
-0,4	-0,4000	-0,3125	-0,2174	-0,1136	0,0000	0,1250	0,2632	0,4167	0,5882	0,7813	0,9998
-0,5	-0,5000	-0,4211	-0,3333	-0,2353	-0,1250	0,0000	0,1429	0,3077	0,5000	0,7273	0,9997
-0,6	-0,6000	-0,5319	-0,4545	-0,3659	-0,2632	-0,1429	0,0000	0,1724	0,3846	0,6522	0,9996
-0,7	-0,7000	-0,6452	-0,5814	-0,5063	-0,4167	-0,3077	-0,1724	0,0000	0,2273	0,5405	0,9994
-0,8	-0,8000	-0,7609	-0,7143	-0,6579	-0,5882	-0,5000	-0,3846	-0,2273	0,0000	0,3571	0,9991
-0,9	-0,9000	-0,8791	-0,8537	-0,8219	-0,7813	-0,7273	-0,6522	-0,5405	-0,3571	0,0000	0,9981
-1,0	-1,0000	-1,0000	-1,0000	-1,0000	-1,0000	-1,0000	-1,0000	-1,0000	-1,0000	-1,0000	-1,0000



$$f' = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}\,f$$

Orijinal frekansı *f* olup,
v hızıyla alıcıya yaklaşan bir ışık kaynağından algılanan frekans (ışık için Doppler formülü):

- *Ya alıcı kaynağa doğru hareket ediyorsa?*

- Can alıcı nokta bu. Alıcının algıladığı frekans, ona dışarıdan bakan gözlemcinin hareketinden bağımsız olmalı; dolayısıyla hem kaynak, hem alıcı bana göre hareket halindeyse bile, ben hesabı istediğim sistemde, örneğin alıcının durağan olduğu sistemde yapabilirim. Tabii yukarıdaki formülün geçerli olması için bu sistemde kaynak tam alıcıya doğru hareket ediyor olmalı; ayrıca kullanacağım bağıl hızı da, bir önceki yanıtta verdiğimiz hız dönüşüm formülüyle bulmam gerek.

- *Ama, ses için durum farklı herhalde. Ses için Doppler olayı, görelilik öncesi de bilinen bir şeydi. Bu durumda hava, tercih edilen, ortak bir koordinat sistemi belirler... Değil mi?*

- Doğru. Ses için kaynak ve alıcının ikisinin de hızlarını havaya göre birbirinden bağımsız tanımlamak mümkün. Ses için Doppler

formülüne bakarsan (Onu burada vermeyeceğim, istersen bir fizik kitabından bakabilirsin), kaynağın ve alıcının hızlarının formülde ayrı ayrı yer aldığını görürsün. Hatta, kaynak sesten hızlı hareket ediyorsa, formülün anlamsız olduğunu bile formülden görebilirsin.

- *Örneğin bir uçak sesten hızlı gittiği zaman, arkasında koni şeklinde bir şok dalgası sürükler, bu dalgaya maruz kalan kişiler şiddetli bir patlama sesi duyar ve (yanlış olarak) "Uçak ses duvarını aştı" derler. Işık için böyle bir şey söz konusu değil tabii...*

- Bir diğer bakış açısına göre, sesin havadaki hızını havanın sıkışabilirliği belirlediğinden, uçağın havayı itişi havanın sıkışabileceğinden daha çabuk olduğunda, hava bir katı cisim gibi davranır ve zorlamayla yırtılır. Patlama sesi işte bu yırtılma sonucu oluşur. Işık söz konusu olduğunda ise; bir cismin *c*'yi, yani boşluktaki ışık hızını aşması mümkün değil; ama optikten hatırlayacaksın ki, bir ortamın içinde ışığın hızı kırma indisi *n* cinsinden *c/n* ile verilir, yani boşluktakinden daha yavaştır.[33] Dolayısıyla bir ortamın içinde *c*'ye yakın bir hızla giden bir parçacık, o **ortamdaki ışık hızından hızlı** olabilir. Bu durumda benzer, ama elektromanyetik bir şok dalgası sürükler peşinden. Bu da detektörler tarafından bir ışık parlaması şeklinde algılanır ve bu olaya **Çerenkov[34] ışınımı** denir. Bazı parçacık fiziği deneylerinde parçacıklar bu yolla algılanır.

33)Aslında bu yavaşlık bildiğimiz yavaşlamaya benzemez. Işık madde içinde atomlar arası boşlukta ışık hızıyla gider. Ama atomlara rastladıkça bunlar tarafından soğurulup salınır. Bu olgu sırasında "durakladığı" için görünürdeki hızı azalmış olur.

34)İsmin asıl yazılışı Kiril alfabesi ile olunca, farklı Latin alfabelerine farklı şekillerde dönüştürülmüş: Cherenkov, Čerenkov, Tscherenkov, …

- *Peki, alıcının durağan olduğu sistemde kaynak tam alıcıya doğru hareket etmek zorunda mı?*

- Değil tabii. Bu durumda Şekil 23 benzeri bir hesap, zor. Ancak, 23. Soru'da biraz bahsettiğimiz, ileride de konuşacağımız dört boyutlu vektörlerin dönüşümü ile bu durum da analiz edilebiliyor.

- *Bu Doppler frekans kaymasının gözlemsel önemi vardır herhalde.*

- Olmaz mı? Bir düşünsene, uzak gökcisimlerinden bize gelen tek şey ışık. Şu ana kadar yalnızca Ay'dan örnek alınabildi, belki Mars'tan filan da alınabilir ama; Güneş Sistemi dışı için, öngörülebilir gelecekte yapabileceğimiz tek şey, bakmak gibi görünüyor. Bu

durumda, gelen ışıktan mümkün olan tüm bilgiyi elde etmek şart, tabiri caizse, sinekten yağ çıkarmamız gerekiyor.

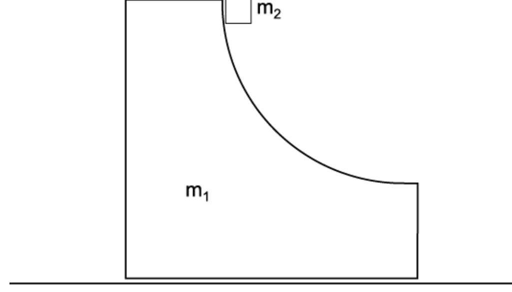
Kaba Doppler kayması, baktığımız cismin bize göre olan hızını veriyor. Bu bilgi ile örneğin, gökadamızın dönüşünü inceleyebiliyoruz —

- *Kayma olduğunu nereden biliyoruz? Yani biz bir frekans ölçüyoruz ama kayma var demek için ışığın orijinal frekansını bilmek gerek. Oraya gidemediğimize göre, bunu nasıl bilebiliyoruz?*

- İşte burada, Newton'dan bahsederken konuştuğumuz fiziğin evrenselliği devreye giriyor. Yıldızların dış kesimindeki nispeten az sıcak atomlar, biraz altlarındaki 3.000-20.000 derecelik atomların verdiği termal ışınımın bazı dalga boylarını soğurabiliyor. Biz, laboratuvar araştırmalarından, hangi atomların hangi dalga boylarında soğurma yaptığını biliyoruz. Bir atom zaten bir dizi dalga boyunu soğuruyor ve bu dalga boyları arasında belli oransal ilişkiler bulunuyor. (En küçük dalga boyu ile ikinci küçüğün arasındaki oran filanca atom için örneğin 1,2, falanca atom için 1,9 oluyor, sonrakinin oranı da yine atoma özgü bir sayı vb.) Bütün frekanslar aynı Doppler kaymasına uğrayınca, hepsi aynı katsayı ile çarpılmış oluyor, dolayısıyla oranlar değişmiyor. Bu oranlar, parmak izinin kişileri belirlediği gibi, atomları belirliyor ve bizim binlerce, milyonlarca ışık yılı uzaklıktaki bir yıldızın dış katmanlarında hangi atomların olduğunu anlamamızı sağlıyor. Bu atomların da laboratuvar koşullarında hangi dalga boylarını soğurduğunu bildiğimiz için, orijinal frekansları bilmiş oluyoruz.

- *Yani hem hareketini, hem kimyasal bileşimini anlayabiliyoruz... Başka ne bilgi edinebiliyoruz?*

- Ayrıntı vermeyeceğim ama, soğurulan dalga boylarından elde edilen Doppler katsayısıyla düzelterek elde ettiğimiz dalga boyu dağılımının tepe noktasından yıldızın yüzey sıcaklığını; bu soğurulan dalga boylarının ne kadar keskin olduğundan yıldızın dönüş hızını; yine bu dalga boylarının "çatallanmasından" yıldızın yüzeyindeki manyetik alanın şiddetini belirleyebiliyoruz.



Şekil 25. Korunum kanunlarının faydaları.

26-Özel görelilikte momentum nasıldır?

- *Biliyoruz ki doğada korunan büyüklükler var, enerji, momentum gibi. Yeni mekanikte bunlar ne oluyor?*

- Momentum ile başlayalım. Newton mekaniğinde momentum, kütle ile vektörel hızın çarpımı olarak (-) tanımlanır ve çarpışmalarda veya sisteme etki eden toplam dış kuvvetin sıfır olduğu durumlarda korunur. Aynı tanımlı büyüklüğü irdelersek, Soru 24'te konuştuğumuz hız dönüşümü yüzünden, çarpışmalarda korunmadığını görürüz. Şekil 24'e bakabilirsin.

- *Ama Şekil 24'te cismin kütlesini, hız 0 iken, v iken ve -iken aynı aldınız. Halbuki ben kütlenin hız ile arttığını duymuştum...*

- Bunu birazdan konuşuruz; diyelim ki değişiyor. O zaman, şimdilik hız 0 iken ölçülen kütle cinsinden bir momentum ifadesi aradığımızı düşünebilirsin...

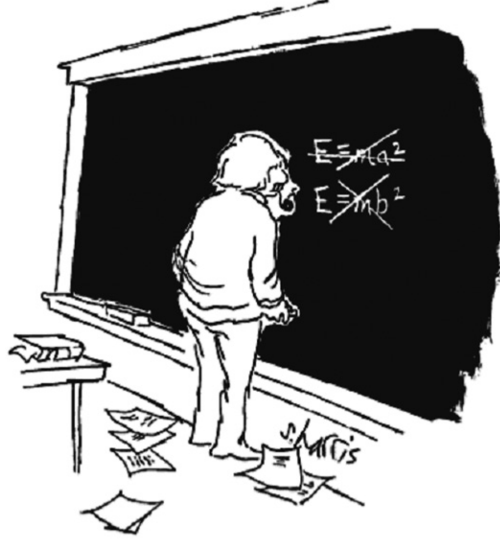
- *Belki özel görelilikte momentum korunmuyordur, olamaz mı?*

- Çarpışmalarda korunmayan şeyin bize bir faydası yok ki.

- *Nasıl yani?*

- Enerji ve momentum korunum yasaları hareket yasalarından bağımsız yasalar değil ki; onların sonuçları. Yani birçok problemi ilke olarak yalnızca hareket yasaları kullanarak çözebiliriz. Ancak, korunum yasalarını kullanabildiğimiz durumlarda, bunlar sonuca çok daha basit ve çabuk varabilmemizi sağlar; çünkü hareket yasaları

diferansiyel denklemler iken, korunum yasaları cebirsel denklemlerdir. Yani hareket yasaları bilinmeyenin türev



Şekil 27. Sidney Harris’in bir karikatürü, *Chalk up another one* adlı seçkiden.

lerini içerir, korunum yasaları içermez.

- *Bir örnek verebilir misiniz?*

- Tabii; Şekil 25’te gösterilen probleme bak. Sürtünmesiz yatay düzlem üzerinde duran bir büyük bloğun kenarında çeyrek daire kesitli sürtünmesiz bir rampa var. Küçük blok bu rampanın tepesinde iken, hareketsiz tutulmakta olan bloklar aynı anda bırakılıyor ve küçük blok rampadan kayıyor. Bulmak istediğimiz, küçük bloğun rampayı terk ediş hızı.

- *Bu problemi neden çözmek isteyeyim ki?*

- Bu bir örnek. Madem yasalar belli sınırlar içindeki tüm durumlar için geçerli, nispeten basit durumlar düşünerek (burada yüzeylerin sürtünmesiz, rampanın daire kesitli olması gibi) yasaları daha iyi anlamaya çalışırız. Yasaları iyi anladıktan sonra, gerçek hayattaki daha karmaşık sistemlere daha güvenle uygularız; ya da bu uygulamaları mühendislere bırakırız.

Her neyse, bu problem için Newton yasalarını kullanmak çok karmaşık bir işlem ve çok dikkatli olmayı gerektiriyor. (Açısı sürekli değişen ve altımızdan kayan bir "eğik düzlem" var; üstelik bu kayma hızı da değişiyor.) İşlemin ara sonucu da bir diferansiyel denklem; yani sonucu bulmak için integral almak gerek. Öte taraftan bu, korunum yasalarını kullanabileceğimiz bir problem ve bu yolla sonucu çabucak bulabiliyoruz.[35]

35)Momentum korunumu $0=m_1v_1+m_2v_2$, enerji korunumu $2m_2gR = m_1v_1^2 + m_2v_2^2$ verir. İlk denklemden v_1'i çözüp ikincide yerine koyarak, kolayca - buluruz.

Sonuç olarak, momentum dediğimiz şeyin çarpışmalarda korunacak şekilde tanımlanması gerekir.

- *Nasıl yapıyoruz bu tanımı?*

- Cevabı vermeden önce, bir ekleme daha yapayım: Momentumun, tüm ikili çarpışmalarda korunmasının bir de sonucu var: Bir cisim ya da sistem için, sabit bir kuvvet etki ettiğinde, momentum değişimi, kuvvetin etki süresiyle çarpımına eşittir[36]; bu klasik fizikte olduğu gibi, özel görelilikte de doğru olacaktır...

36)Lise son veya üniversite öğrencileri için: Kuvvetin sabit olmama durumunu da kapsayan genel kural; kuvvetin, momentumun zamana göre türevi olduğunu söyler.

Sonuçta, çarpışmalar hakkında biraz daha düşünür, daha doğrusu Lorentz hız dönüşümünü de göz önüne alan bir hesap yaparsak (bu hesap Şekil 24'ün altyazısındakinden daha karmaşık, o yüzden hiç göstermiyorum) -'nin (γ, *v* hızına ait olmak üzere) korunduğunu görürüz. Dolayısıyla özel görelilikte momentum bu ifade ile verilir.

- *Ama ışık hızına yaklaşıldığında* γ *sonsuza kadar büyümüyor muydu?*

- Tamamen doğru! Yani bir cismi ışık hızına ulaştırmak demek, momentumunu sonsuza çıkarmak demek. Bunun için de, örneğin, sabit bir kuvveti sonsuz bir süre için etki ettirmek gerekir; ya da sonsuza kadar zamanımız yoksa , sonsuz kuvvet etki ettirmek.

- *Tabii bu, kütlenin sıfır olduğu durumda geçerli değil...*

- Bu durumda γ*m* çarpımı belirsizleşiyor, değil mi? Sonsuz çarpı sıfır... Sonsuzu bir sayıyla çarparsanız sonsuz, sıfırı bir sayıyla çarparsanız sıfır çıkar; bu ikisini birbiriyle çarparsanız ne olacak?

- *Galiba bu, matematikte gördüğümüz belirsiz ifadelerden biri...*

- Doğru. Bu ifadenin ne sonuç vereceği, duruma göre değişebiliyor; sıfır, sonsuz veya arada herhangi bir sonuç çıkabiliyor. Her durumda bu, kütleli bir cismin ışık hızına ulaştırılamayacağı, ancak kütlesiz parçacıkların ışık hızında gidebileceği anlamına geliyor.

- *Bu yüzden mi ışık hızı sınır?*

- Evet, bu sınırı anlamanın bir yolu bu.

27-Kütle ile enerji arasındaki ilişki nedir? E=mc2 ne demektir?

- *Doğada korunan diğer büyüklük, enerji nasıl etkileniyor?*

- Enerjiyi taa ilkokulda bile (artık ilköğretim), iş yapabilme yeteneği olarak tanımlarız. İşten ise, bir *F* kuvvetinin bir *s* yolu boyunca etki etmesi durumunda söz ederiz—

- *Hep aklıma takılır, ama pek soramadım, sorduğum zaman da düzgün cevap alamadım: Bu tanıma göre ben 30 kiloluk bir su bidonunu kucağımda tutarsam iş yapmıyorum, değil mi?*

- Sabit tutarsan, yapmıyorsun.

- *Ama yoruluyorum! Bu nasıl iş yapmamak? Bunu yapmam gerekse para isterdim...*

- İş yapmadığını şöyle anlatabilirim: Bidonu senin tuttuğun yükseklikte bir masanın üstüne koy. Şimdi aynı şeyi, yani bidonu sabit yükseklikte tutmayı masa yapabiliyor, değil mi? Masa yorulur mu? Masaya bidonu tutması için para ödemek gerekir mi? Senin yorulman ise, kaslarımızın kasılmış durumlarını sürdürmek için hücrelerinde oluşan kimyasal tepkimelerde enerji harcamalarından ileri geliyor.

- *Anladım gibi... Enerji ve göreliliğe dönersek?*

- Sabit kuvvet için iş, kuvvetin yola paralel bileşeni ile *s*'in çarpımı ile tanımlanır. Kuvvetin sabit olmadığı durumları da kapsayan, daha genel bir tanım da yapılabilir.[37] Bir cismin hareketinden dolayı sahip olduğu enerjiye **kinetik enerji** denir ve bu enerji, o cismi durağan halden *v* hızına getirirken yapılan işe eşit olmak zorundadır. (Çünkü enerji, iş yapabilme yeteneği idi.)

[37])Lise son veya üniversite öğrencileri için: Kuvvetin paralel bileşeninin yol üzerinde integrali.

Bir önceki soruda çıkarttığımız momentum ifadesi kullanılarak gösterilebilir ki, v hızındaki bir cismin kinetik enerjisi $(\gamma\text{-}1)mc^2$'dir—[38]

[38])Maalesef bunun integralden başka yolu yok.

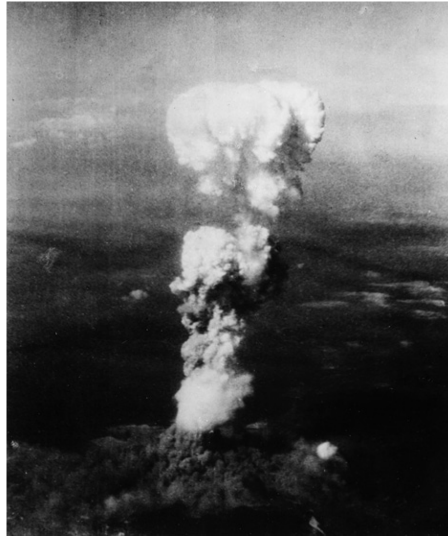
- *Bir dakika... Ben kinetik enerjiyi* $mv^2/2$ *olarak biliyorum ve Soru 4'te konuştuklarımıza göre düşük hızlarda* $mv^2/2$ *hâlâ doğru olmalı. Ama bu epey farklı görünüyor...*

- Öyle görünüyor olabilir, ama ışık hızına göre düşük hızlar için $(\gamma\text{-}1)$, yaklaşık $v^2/(2c^2)$'ye eşittir; 16. Soru'daki γ tablosuna bakabilirsin.[39] mc^2 ile çarpınca, hatırladığın ifade çıkar.

[39])Üniversite öğrencileri bunu Binom açılımını kullanarak çıkarmayı deneyebilirler.

Şimdi "esnek olmayan", yani kinetik enerjinin korunmadığı, ama toplam enerjinin korunduğu bir çarpışma düşünelim. Şekil 26'nın üst kısmına bakabilirsin. Bunun için, kinetik enerjiden kaybolan enerjinin saklanacağı bir sistem gerekir, bizim örneğimizde bu sıkışan kütlesiz bir yay olsun. Tabii maksimum sıkışma anında sistemin bir şekilde kilitlenmesi gerekir, yoksa çarpışma esnek olurdu.

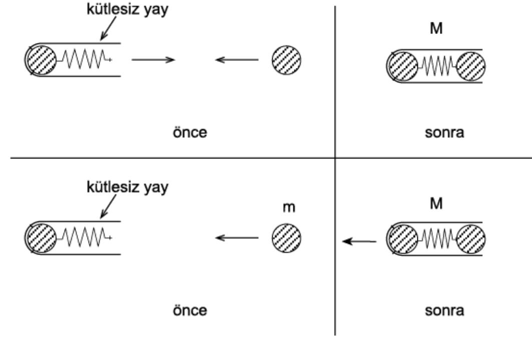
-



Şekil 28. Hiroşima'ya atılan atom bombasının, bombayı atan uçaktan (Enola Gay) çekilmiş fotoğrafı.

Yaklaşık 6 kg uranyumun 1 gr'dan biraz azının enerjiye dönüştüğü bu bombada, yaklaşık 90 trilyon Joule enerji açığa çıktı; ki bu da yaklaşık 20.000 ton dinamite, 20 kiloton TNT'ye eşdeğer.

-



Şekil 26. Esnek olmayan, ama enerjiyi koruyan bir çarpışma. Enerjinin kütlesi olduğunu göstermek için.

Bizim çarpışmaya dönelim… Şekil 26'nın üst kısmı, olayı toplam momentumun sıfır olduğu sistemden gösteriyor; alt kısmı ise, aynı olayı soldaki kütlenin çarpışmadan önce durağan olduğu sistemden. Görelilikte bunu sık sık yaparız, çünkü bir sistemde olay çok daha basit görünüp, o sistemde bulduğumuz çözüm başka bir sistemde bizim ayrıca işimize yarayabilir.

Şimdi, şeklin üst kısmından kolayca yayda depolanan enerjinin, iki kütlenin kinetik enerjilerinin toplamı olması gerektiğini görebiliriz. (Kinetik enerjinin tamamı kayboluyor çünkü.) Bu da yay enerjisinin $2(\gamma-1)mc^2$ olduğu anlamına gelir.

Şeklin alt kısmında ise hızlar, Şekil 24'teki gibi, üstteki karşılık gelen hızların *v* hızı ile dönüştürülmüş halleri. Soldaki kütlenin hızı, aynı zamanda tanım gereği sıfır. Sağdakinin hızı ise, -. Bu hızı kullanarak momentumunu (*x* bileşeni tabii) hesaplayabilirsin; birkaç adımlık işlemden sonra $-2\gamma^2 mv$ çıktığını görürsün. Momentum korunduğuna ve soldaki kütlenin çarpışmadan önceki momentumu sıfır olduğuna göre, bu değer aynı zamanda birleşik sistemin de momentumu. Öte yandan, bu sistemin hızı *v* olduğuna göre, kütlesi $M = 2\gamma m$!

- *Ama sistem iki tane m kütlesinden oluşuyor! Toplam kütle 2m olmalı değil mi?*

- Demek ki bir sistemin kütlesi, parçalarının kütlelerinin toplamı değilmiş! Farka bakalım, $2(\gamma-1)m$ çıkıyor; yani yayın durağan olduğu sistemdeki enerjisinin c^2'ye bölünmüş hali. Sonuçta sisteme E kadar enerji eklenince, kütlesi E/c^2 kadar arttı. Yani enerjinin de kütlesi var!

Biz bunu basit bir örnek için gösterdik, ama herhangi bir sistem için de gösterilebilir. Demek ki kütle ve enerji eşdeğer. Dolayısıyla kütlenin de enerji karşılığı vardır ve biraz yukarıda verdiğimiz, v hızında giden m kütleli cismin kinetik enerjisi ifadesine mc^2'yi eklersek, γmc^2'lik bir toplam enerji buluruz.

- *Hani $E = mc^2$ idi? Siz bir de γ çarpanı eklediniz...*

- Aslında tam doğru ifadeler şöyle:



Durağanlık -ya da kütle- enerjisi: $\boldsymbol{E_0 = mc^2}$

Toplam enerji: $\boldsymbol{E = \gamma mc^2}$

İlk ifadedeki *0* alt-indisi, durağanlığı ifade ediyor; yani durağan bir cismin, yalnızca kütlesinden dolayı mc^2 kadar enerjiye sahip olduğunu söylüyor; ikinci ifade ise, kinetik enerjiyi de katıyor; tabii ki o daha genel, birinciyi de kapsayan bir ifade.

Artık kütleyi de enerjinin yoğunlaşmış bir şekli olarak düşünmemiz gerektiğine göre, Şekil 26'daki kütle-yay-kütle sistemini tekrar değerlendirelim. Sistemin momentumunun sıfır olduğu gözlemciye göre enerjisi, $2mc^2$ ile yay enerjisinin toplamıdır. Yay enerjisi de (enerjinin korunumundan) $2(\gamma-1)mc^2$, dolayısıyla toplam enerji $2\gamma mc^2$ çıkar; yani Mc^2. Bu ilişki de tüm sistemler için geçerlidir: Bir sistemin kütlesi, momentumunun sıfır olduğu gözlemciye göre enerjisinin c^2'ye bölünmesi ile bulunur.

- *Enerji gözlemciye göre değişiyor yani...*

- Bu çok doğal değil mi? Sonuçta durağan bir cismin kinetik enerjisi sıfırdır ve bir cisim bir gözlemciye göre durağan olup, farklı diğer gözlemcilere göre farklı hızlara sahip olur. Bu klasik fizikte de, özel görelilikte de böyledir.

- *Kütle ile enerji eşdeğerse, birbirine dönüşebilmeleri gerekir. Bu dönüşüm, nükleer tepkimeler ile oluyor, değil mi?*

- Enerji veren bir çekirdek tepkimesinde, (örneğin bir atom bombası ya da nükleer santral) tepkimeye giren maddelerin toplam kütlesi, tepkimenin ürünlerinin toplam kütlesinden büyüktür. Aslında hidrojen bombası ve Güneş'te etkin olan çekirdek kaynaşması (füzyon) daha basit bir örnek. Bu tepkimede, dört hidrojen çekirdeği (yani proton) kaynaşıp bir helyum çekirdeği oluşturur. Bir hidrojen atomunun kütlesi 1,007825 u[40], bir helyum atomununki ise 4,00268 u'dur. Yani bir helyum atomunun kütlesi, dört hidrojen atomununkinden azdır. Aradaki fark, yani 0,02862 u, enerjiye dönüşür.

40)u, atomik kütle birimidir.

- *Ama kaynaşanlar çekirdekler, siz atomların kütlelerini kullandınız. Elektronların da kütleleri var, onlar hesabı bozmuyor mu?*

- Güneş nötr (toplam elektrik yükü sıfır) olduğuna ve nötr kaldığına göre, yok olan dört proton ile birlikte, iki de elektron yok olmalı, çünkü helyum çekirdeğinin yükü iki proton kadar. Her ne kadar Güneş bir plazma olup, hidrojen ve helyum atomları tamamen çekirdek ve elektronlara ayrışmışsa da, kütle farkı hesabı tutuyor. Elektron katkısını anlamanın bir diğer yolu da, helyum çekirdeğinde iki proton ve iki nötron olduğunu hatırlamak. Dört hidrojen atomunun toplam dört elektronunun ikisinin protonlarla birleşip, nötron yaptığını düşünebilirsin; ki bu çok yanlış da değildir.

- *Bir dakika... Şimdi ben tablodan nötron kütlesini kontrol ettim, protondan biraz büyük. Helyum çekirdeğinde iki proton, iki nötron varsa, nasıl oluyor da kütlesi dört protondan az olabiliyor?*

- Helyum çekirdeğinde iki proton ve iki nötron birbirlerine güçlü çekirdek kuvveti ile bağlı. Bağlanma enerjisi de her zaman negatiftir, dolayısıyla E/c^2'den kütleye negatif katkı yapar—

- Ne demek negatif enerji? Ben bu deyimi yalnızca, bazılarının birinden hoşlanmadıklarında kullandıklarını duymuştum...

- Biz böyle kullanmıyoruz. Hatta fizikte, negatif enerjinin hoşlanmayı gösterdiği bile düşünülebilir, çünkü iki nesneyi birbirine bağlayan etkileşimin enerjisi negatiftir. Şöyle ki, bağlı bir sistemi ayırmak için enerji vermek (iş yapmak) gerekir. Demek ki, sistemin ayrılmış bileşenlerinin toplam enerjisi, sistem halindeyken sahip oldukları enerjiden fazladır. Yani, (Sistemin enerjisi) = (bileşenlerinin enerjileri toplamı) + (bağlanma enerjisi) dersek, bağlanma enerjisi negatif olur.

Bir çekirdekteki proton ve nötronlar, "güçlü çekirdek kuvveti" dediğimiz bir etkileşimle birbirine bağlanır. (Bu olmasa, pozitif olan protonların birbirini itmesi, çekirdeği parçalardı.) Helyum çekirdeğinin kütlesi dört protondan az olduğuna göre, demek ki bu bağlanma enerjisinin negatif katkısı, proton-nötron kütle farkının iki mislinden büyükmüş. Böyle olmak zorunda değildi; ama olmasaydı, bu tepkime enerji veren (ekzoterm) bir tepkime olmaz, dolayısıyla bildiğimiz anlamda yıldızlar varolmaz, sonuç olarak evren çok farklı ve büyük olasılıkla yaşamın olmadığı bir yer olurdu.

- Bu örnekte, yaklaşık dört birim kütle tepkimeye giriyor, yaklaşık 0,03 birimi enerjiye dönüşüyor; yüzde 1'den bile az. Halbuki çekirdek kaynaşması (füzyon) -eğer kontrollü yapılması başarılabilirse- neredeyse sonsuz enerji kaynağı olacak diye sunuluyor. Bu enerjiye dönüşme oranını daha yukarı çekmenin yolu yok mu?

- Çekirdek tepkimelerini incelersek, bu tepkimelerde proton + nötron sayısının hiç değişmediğini görürüz. Yani bu tepkimeler, bazı protonların nötronlara ya da bazı nötronların protonlara dönüşmesi ve sonrasında bu nötron ve protonların yeniden gruplanmasından ibarettir. Tabii nötronlar nötr oldukları için, protonun nötrona dönüşmesi için pozitron[41] salması ya da elektron yakalaması gerekir, nötron da protona ancak elektron salarak ya da pozitron yakalayarak dönüşebilir. Salınan ya da yakalanan elektronların ya da pozitronların kütlesi proton ve nötrondan yaklaşık 2000 misli küçük, hatta bu kütlelerin karşılık geldiği enerji, proton ve nötronların bağlanma enerjisinden küçük olduğu için, enerjinin ezici çoğunluğu proton ve nötron kütlelerindedir; bunların da toplam

sayısının değişmemesi, toplam kütledeki değişimin küçük bir oranda kalacağı anlamına gelir. Bu yüzden açığa çıkan enerji, maddenin yok olmasından çok, bağlanma enerjilerindeki değişimden kaynaklanıyor ve kütlenin enerjiye dönüşüm oranları bu kadar küçük.

41)Elektronun antiparçacığı. Yükü elektronla ters işaretli, kütlesi aynıdır. Bir parçacık ile antiparçacığı tepkimeye girerse, tüm kütle enerjiye dönüşür, bu enerjiden başka parçacık-antiparçacık çiftleri oluşabilir.

- *Hiroşima ya da Nagazaki patlamalarını yaşayanlar, bu orana küçük dememize itiraz ederlerdi sanırım; ama anlıyorum. Peki çekirdek tepkimelerinde proton + nötron sayısı neden değişmiyor?*

- Önce Hiroşima ve Nagazaki'den bahsedeyim. O bombalarda yaklaşık 6 kg uranyum ya da plutonyumun 1 gramdan biraz azı enerjiye dönüştü. mc^2 formülünden bunun yaklaşık 90 trilyon Joule olduğunu hesaplayabiliriz, ki bu da yaklaşık 20.000 ton dinamite eşdeğer. (20 kiloton TNT)

Proton + nötron sayısının korunmasına gelince, öncelikle bunun görelilikle çok ilgisi yok. Parçacık fiziği deneyleri ve kuantum kuramının geliştirilmiş (görelilik ile uyumlu hale getirilmiş) şeklinin bunlara uygulanması bize anlatıyor ki, proton ve nötron, **baryon** dediğimiz daha geniş bir parçacık ailesinin üyeleridir ve baryon sayısı (baryonların adedi eksi antibaryonların adedi), parçacık fiziğinin standart modeline dahil olan üç etkileşimde de korunur.[42] Dolayısıyla, bu "neden" sorusunun cevabı,

42)Aslında **lepton sayısı** denen bir büyüklük daha korunur. Bu da elektronu, **nötrino** denilen ve oluştuktan sonra neredeyse hiç etkileşmeyen bir parçacığı, bunların "akraba"larını ve antiparçacıklarını kapsar. Nötrinoların etkileşimsizliği, açığa çıkan enerjinin bir kısmının da kaybına yol açar; ancak leptonların kütleleri düşük olduğundan, kütlenin enerjiye dönüşümü oranlarını fazla değiştirmezler.



23. Soru'da olduğu gibi, "evrenimiz böyle"ye dayanıyor artık. Her durumda, bu soruyu benden çok, bir parçacık fizikçisine ya da kuantum alanları kuramcısına sorman uygundur.

- Baryon sayısının üç etkileşimde korunduğunu söylediniz. Ya dördüncüsü?

- Ben kuantum genelçekiminde korunmayacağını düşünüyorum, belki daha sonra kara deliklerden bahsederken konuşuruz… Ama parçacık fiziği bağlamında şimdiye kadar yapılabilen deney ve gözlemlerde genelçekim etkileri ihmal edilebilir; düşünce deneyi olarak bile ancak çok uç durumlarda (çok küçük kara delikler, evrenin ilk, dolayısıyla en yoğun anları gibi) önemi var.

- *Peki, nükleer öncesi enerjinin de kütle karşılığı var mı?*

- Kuramsal olarak var. Ancak kimyasal tepkimelerde (yanma gibi) söz konusu olan enerjiler kütle enerjisine göre o kadar az ki, toplam kütle değişimi ihmal edilebilir, hatta ölçülemeyecek kadar küçük. 6 kg'ın 1 gr'dan azının enerjiye dönüşmesinin 20.000 ton dinamitin patlamasına eşdeğer olduğunu hatırla. Bu yüzden kimyadaki Lavoisier yasası, kimyasal tepkimelerde kütlenin korunduğunu söyler...

- Fransız Devrimi'nde idam edilen kimyacı değil mi o?

- Kendisi modern kimyanın kurucularından; fizik de dahil bilimin geneline de epey katkısı var. Bu katkılar yüzünden idamdan

vazgeçilmesi istendiğinde yargıç, “Cumhuriyetin kimyacılara ihtiyacı yoktur” demiş…

- *Korkunç... Suçu neymiş peki?*

- Temelde, soylu olmak. Özelde ise, yıkılan monarşinin başta önemli bir vergi toplama kurumu olmak üzere, çeşitli kurumlarında üst düzey idarecilik yapmış olmak. Hiç değilse, Galileo’nun aksine, onun itibarının iadesi yalnızca 1,5 yıl sürmüş…

28-Kütle hız ile değişir mi?

- *Peki, kütle-enerji konularına dönelim... Kütlenin hız ile arttığını duyduğumu söylemiştim.*

Momentum ifadesini hatırla. -, ama klasik fizikte - idi. Yeni momentum ifadesini eskisine benzetmek için, bazı bilimciler ve yazarlar, *m*’ye m_0, yani durağanlık kütlesi, γ*m*’ye (bu durumda γm_0’a) *m*, yani göreli kütle diyelim dediler. Yani kütle kavramını böyle genelleştirebiliriz diye düşündüler.

Ancak, bu yeni “kütle” ile - yazamıyoruz. O zaman bu tanımın faydası ne? Klasik fizikte kütle, - ve - denklemlerinde eylemsizlik (eski dilde “atalet”) ölçüsü olarak ve genelçekim yasasında çekim kuvveti yaratma ve ondan etkilenme ölçüsü olarak kullanılıyor. Halbuki özel görelilik mekaniğinde - ve - denklemleri çelişiyor. Genelçekim ise, genel göreliliği konuşurken göreceğimiz gibi, özel görelilik ile uyumlu değil. Genel görelilikte anlıyoruz ki, bir sistemin genelçekimsel özellikleri tek bir rakamla ifade edilemez. (Bir sistem, ya da noktasal olmayan bir cisim için 4×4 bir matris, noktasal bir cisim için dört boyutlu bir vektör kullanılır.)

Öte yandan, teraziye koyup tartamayacağın kadar küçük bir şeyi düşün, örneğin bir atomaltı parçacığı. Hatta bunların çoğu zaten kısacık sürelerde bozunup yok olduğu için, zaten tartamazsın. Kütlesini nasıl belirleyeceksin? Parçacık fizikçileri bunların momentumunu (yükü bildikleri için üzerine etki eden elektrik ya da manyetik kuvveti biliyorlar, yörüngeyi bir iz şeklinde görebiliyorlar,

yörüngenin eğriliği momentumu veriyor) ve enerjisini (yok olduğu zaman açığa çıkan ısıyı ölçerek) ölçebiliyorlar. Sonra da $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ formülü ile ($p = \gamma mv$ ve $E = \gamma mc^2$ bağıntılarını birleştirerek bulabilirsin) kütleyi buluyorlar. İşin can alıcı noktası şu: Tabii ki bazı deneylerde aynı parçacıktan yüzlerce, binlerce, hatta milyonlarca oluşabiliyor; bunların her birinin momentumu ve enerjisi farklı olabiliyor. Ama $E^2–p^2c^2$'yi hesaplayınca, ne kadar farklı enerjiler ve momentumlar olsa da, aynı şey çıkıyor. Bu yüzden, bu yolla hesaplanan kütle, o parçacığı tanımlayan özelliklerden biri oluyor, yükü, spini ve diğer kuantum sayıları ile birlikte. Ve buna basitçe "kütle" deniyor; enerjiyi zaten ölçmüşüz, onu bir sabite, yani c^2'ye bölüp de yeni bir isim daha vermenin âlemi yok.

Tek bir kütle kullanmak için bir sebep de şu: Soru 22'de bahsettiğimiz uzay-zaman kavramını kullanıp, dört boyutta çalışmak/düşünmek istersek, dört boyutta vektörler ve daha üst mertebe matematiksel nesneleri kullanmak doğal hale geliyor. Bu durumda mekanik ile ilgili ifadelerden γ kayboluyor ve formüller basitleşiyor. Örneğin, dört boyutta hem $p = mv$, hem $f = ma$ yazılabiliyor. Bu formüllerde, **bahsettiğimiz** kütle var, "göreli kütle" değil; üstüne üstlük, bu kütlenin karesi, dört boyutlu momentum vektörünün "uzunluğunun karesi" olan skaler büyüklüğe orantılı.

- *Yani, Lorentz dönüşümleri ile değişmeyen bir anlamı var... Ama neden bazı kitaplar "göreli kütle" kullanıyor?*

- Aslında "göreli kütle", - yazmaktan başka bir işe yaramaz; bu da onu anlamsızlaştırır. Tek bir formüle giren bir büyüklük bir işe yaramaz ki, o formülle onu hesaplarsın, ama başka bir şey için kullanamazsın. ("Göreli kütle" ile yazılabilecek $E = mc^2$ formülü sayılmaz; bu enerjiyi farklı bir birimde ifade etmekten ibaret.) Örneğin bir kuvvet etki ettiği zaman oluşacak olan ivmeyi ya da üzerine etki edecek genelçekim kuvvetini hesaplayamazsın. (E enerjili durağan bir cisim ile E enerjili hareketli bir cisme etki eden genelçekim kuvvetleri aynı değildir.)

Sonuç olarak, "göreli kütle", bir çıkmaz sokaktır. Yalnızca üç boyutta özel görelilik düşüneceksen kullanabilirsin, ama seni buna sınırlar.

Eğer dört boyutta düşünmek, parçacık fiziğine veya genel göreliliğe devam etmek istiyorsan, tek kütle kullanman gerekir. Hem Occam'ın usturası ilkesi de "gerekmeyen yeni kavram kullanma" demiyor muydu?

29-Dört boyutlu vektörler nasıldır? Dört boyutu birlikte düşünmenin avantajları nelerdir?

- *Kütlenin karesi, dört boyutlu momentum vektörünün "uzunluğunun karesi" ile orantılı ise... aynı zamanda $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ olduğuna göre, enerji de mi dört boyutlu momentum vektörünün parçası oluyor?*

- Evet. Dört boyutta düşündüğümüz zaman, *E/c* ile momentum bileşenleri bir vektör oluşturur. Bu vektöre dört boyutlu momentum vektörü ya da enerji-momentum 4-vektörü deriz.

Lorentz dönüşümlerini, dört boyutlu uzay-zamanda bir koordinat dönüşümü olarak yorumluyoruz. Bu dönüşüm yapılınca, tüm dört boyutlu vektörlerin (ayırt etmek gerektiğinde kısaca *4-vektör*) bileşenleri, *x, y, z, t* ile aynı matematiksel şekilde dönüşürler, yani ikinci gözlemcinin ölçeceği bileşenleri birincinin ölçtükleri cinsinden hesaplamak için aynı formüller kullanılır. (Bir başka bakış açısıyla, 4-vektörler, bileşenleri *x, y, z, t* gibi dönüşecek şekilde tanımlanır.) Bu özelliğin bir sonucu olarak, 4-vektörlerin iç çarpımları da dönüşüm ile değişmez.

Dönüşüm ile değişmeyen büyüklükler önemlidir, çünkü bunlar tüm gözlemcilerin değerleri üzerinde uyuştukları büyüklüklerdir—

- *y ve z bileşenleri gibi mi? Lorentz dönüşüm formüllerinde y'=y ve z'=z vardı...*

- Hayır, onların değişmezliği yalnızca, ikinci gözlemci eğer *x* yönünde hareket ediyorsa geçerli; doğalarında değişmezlik yok. Benim kastettiğim büyüklükler, ikinci gözlemci hangi hızla ve hangi yöne hareket ederse etsin, değişmeyenler. Dolayısıyla bunlar, gözlenen cismin hareket ile ilgisi olmayan özelliklerine karşılık gelmek zorundalar, cismin salt **varlığı** ile sahip olduklarına...

Örneğin... örneğin... Bizim çoban ile makinist, bir karganın hızının bazı bileşenleri konusunda uyuşmayabilirler, ama uçanın karga olduğu, serçe ya da tavuskuşu olmadığı konusunda hemfikirdirler.

Enerji-momentum 4-vektörünün "uzunluğunun karesi", yani kendisi ile iç çarpımı $-m^2c^2$ olduğundan (m, "göreli kütle" **değil**), m de bu tür, gözlemciye göre değişmeyen özelliklerdendir.

- *Yani biraz kargalık ya da serçelik gibi…*

- Evet! Örneğin gözlenen bir elektron ise, bu m, $9{,}1\times10^{-31}$ kg, aynen yükü olan $1{,}6\times10^{-19}$ C gibi, onun **elektronluğu**nun bir parçası… İşte yukarıdaki tek kütle kullanma sebebinin bir başka açıklaması.

Lorentz dönüşümünün vektörlerden başka, tensör denen daha karmaşık objelere etkisini de incelemek mümkün. Bunlara, sanki vektörlerin çarpımlarıymışlar gibi etki ediyor, yani bir anlamda dönüşümler uyumlu. Bu uyum sayesinde dört boyutta 22. ve 28. Sorularda bahsettiğimiz basitleşmeler oluşuyor, yasalar ve çeşitli bağıntılar üç boyutta yazılabileceğinden daha basit yazılabiliyorlar.

- *Ama, Soru 24'teki hız dönüşümleri x, y, z, t'nin dönüşümleri kadar basit gözükmüyordu. Hız da bir 4-vektör yapılamıyor mu?*

- Dört boyutlu hız vektörü, $(\gamma v_x , \gamma v_y , \gamma v_z , \gamma c)$'dir.[43] Bu bileşenler cinsinden dönüşüm basit, v_x, v_y, v_z cinsinden yazınca karmaşık oluyor.

43)Aslında bazı tarihsel sebeplerden zaman bileşenine dördüncü değil, sıfırıncı bileşen deriz ve hız 4-vektörünü (γc, γ-) olarak yazarız. Hem sıfırıncı bileşen demek, zamanın farkını vurgulamaya da yarıyor.

- γ*'lar nereden geldi?*

- Hız vektörü, konum vektörünün zamana göre türeviydi, değil mi? Dört boyutta ne yapacağız? Şimdi zaman zaten konum vektörünün bileşenlerinden biri; ona göre türev almak pek doğal gelmiyor, değil mi? Doğal olan, skaler bir büyüklüğe, burada hareketlinin özzamanına göre türev almaktır. γ'lar işte bu zaman ve özzaman aralıkları arasındaki orandan geliyor. (Zaman genleşmesi.)

- *Doppler olayından bahsederken, alıcının durağan olduğu sistemde kaynak tam alıcıya doğru hareket etmezse 4-vektör kullanırız demiştiniz. Nasıl?*

- “Dalga vektörü” dediğimiz bir vektörü de dört boyutlu yapabiliyoruz. Bu vektörün uzay bileşeninin büyüklüğü $2\pi/\lambda$, uzayda yönü elektromanyetik dalganın hareket yönü, zaman bileşeni ise $2\pi f/c$. Bu 4-vektöre ne tarafa bakarsa baksın, Lorentz dönüşümü uygulayabilir, dönüşmüş zaman bileşeninden, diğer gözlemcinin ölçeceği frekansı bulabiliriz. Eğer ışığın kuantum doğasını da düşünmek istersek, bu 4-vektörün $h/2\pi$ (*h*: Planck sabiti) ile çarpılmış hali, o dalganın bir fotonunun enerji-momentum 4-vektörünü verir. Bu durumda fotonun enerjisinin artması ya da azalması Doppler olayına karşılık gelir.

Her durumda, 4-vektörler yardımıyla, üç boyutta kafa karıştıracak birçok özel görelilik konusu netleşiyor ve hesapları daha kolay yapılabiliyor. Genel görelilikte ise, zaten başka seçenek yok...

30-Işıktan hızlı giden nesneler olabilir mi?

- 26. Soru’da anladık ki -, dolayısıyla kütleli bir cismi ışık hızına çıkarmak için ya kuvvetin ya da onu uyguladığımız sürenin sonsuz olması gerekiyor. Sonraki iki soruda da $E = \gamma mc^2$ olduğunu gördük, bu formülden de aynı işlem için gereken enerjinin sonsuz olduğunu anlıyoruz. Yani...

- Kütleli bir cismi hızlandırarak ışık hızına çıkaramazsın.

- Peki, zaten ışıktan hızlı giden nesneler olamaz mı? Bilimkurgu film ve kitaplarında sık sık ışıktan daha yüksek hızlara atlama sahneleri görüyoruz. O yazarlar ya da senaristler çok mu cahil?

- Yazarlar ya da senaristler, cahil olmadıkları halde, bazen “hedef kitle”yi genişletmek için özellikle cahilce yazabiliyorlar. Ancak bu örneklerde, ışıktan hızlı yolculuk/iletişim kurgulamaya mecburlar, aksi takdirde Galaksi İmparatorluğu ya da Cumhuriyeti ya da Yıldızlararası Federasyon gibi binlerce ışık yılını kapsayan politik yapılar kurgulayamazlar. Işık hızı eğer sınır ise; gökadamız yaklaşık 100.000 ışık yılı çapında olduğuna göre, merkeze yakın bir “hükümet”in (yönetim şekli ne olursa olsun) aldığı bir kararın haberinin uzak bölgelere ulaşımı 50.000 yıl sürer.

- Bu durumda düşündüm ki, Güneşimize en yakın yıldız, Alfa Centauri[44]*, 4,3 ışıkyılı uzaklıkta ve gökadamızın bu bölgeleri için bu normal. Yani o sisteme insanlar yerleşmiş olsalar ve bize bağlı olsalar, buradaki bir hükümetin yollayacağı bir iletiye onların cevabı gelene kadar burada iki kez seçim olur, hükümet değişebilir. En yakın yıldızdan bahsediyoruz! Yani ışık hızı sınır ise, bir yıldızın gezegen sisteminden daha büyük bir politik yapı olamaz! Elveda yıldızlararası krallıklar, imparatorluklar, federasyonlar, cumhuriyetler!... Lütfen ışıktan hızlı gitmek, hiç değilse iletişim kurmak gelecekte mümkün olsun... Olamaz mı?*

44)Aslında bu, üç yıldızdan oluşan bir sistemdir.

- Kısa cevap: Bence olamaz.

"Yalnızca" bilgiyi taşımak diye bir şey yoktur. Bilgi de parçacıklar ile taşınır, örneğin ışığın foton denilen parçacıkları vardır. (Etkileşimlerin de parçacıklar tarafından taşındığını bize kuantum alan kuramları söylüyor.) Dolayısıyla, ışıktan hızlı bilgi iletimi için de bazı parçacıkların ışıktan hızlı gitmesi gerekir.

Bu iddiam, kısmen ışıktan hızlı parçacıklar ("takiyon" deniyor) için, enerji-momentum-kütle bağıntılarının sanallık[45] içermesinden kaynaklanıyor. Ama daha kuvvetli neden, ışıktan hızlı gitmenin görelilik ve nedensellik ilkelerinden birinin ihlali anlamına gelmesi.

45)Sanal sayılar, negatif sayıların karekökleridir. Pozitif sayıların kare-köklerine "gerçel sayılar" (bazen, "reel sayılar") deriz. Sanal sayılar, *b* gerçel ve - olmak üzere, *ib* olarak yazılabilir. *a* ve *b* gerçel olmak üzere, *a* + *ib* olarak yazılabilen sayılara da "karmaşık sayılar" (bazen "kompleks sayılar") denir.

- Nasıl sanallık?... Anladım galiba; ışığınkinden büyük hızlar için, γ *sanal oluyor!*

- Evet. Buna tamamen olamazlık işareti olarak da bakabilirsin, ama hadi zorlayalım bakalım... $E = \gamma mc^2$ olduğuna göre, takiyonların kütlelerinin sanal olması gerek. Sanal kütlenin ne anlama gelebileceği açık bir soru, ama bir sistemin ya da cismin kütlesi, momentumunu sıfır olarak ölçen gözlemcinin ölçtüğü enerjiye orantılı olduğuna ve ışıktan hızlı bir cismin momentumunu kimse sıfır ölçemeyeceğine göre, çok tutarsız değil.

- Neden kimse momentumu sıfır ölçemiyor?

- Çünkü öyle bir Lorentz dönüşümü yok. Bir takiyonun momentumunu sıfır ölçecek gözlemci, takiyon ile beraber

-



Şekil 30. *Terminator* filmindeki Yokedici; bir "zaman yolcusu."

hareket emek zorundadır; yani standart bir gözlemciye göre o da ışıktan hızlı gitmeli. Bu da dönüşüm için kullanılan *u* hızının *c*'den büyük, dolayısıyla dönüşümün γ'sının sanal olması demek. Ancak, bu kabul edilemez, çünkü sanal bir koordinat sistemine geçmek anlamına gelir.

- *Peki neden kütlenin sanal olabileceğini düşünüyoruz? Enerji sanal olamaz mı?*

- Diyelim ki öyle. O zaman, enerji korunumu gereği, bir takiyon oluştuğu zaman, başka ne olmalıdır?

- *Hımm... Normal, yani ışıktan yavaş parçacıkların -bu arada, onların takiyon ile tezat yapan bir ismi var mı?- enerjilerinin gerçel, takiyonlarınkinin sanal olacağını düşünelim... Tepkimeden önce takiyon yoksa toplam enerji gerçeldir; dolayısıyla bir takiyon, yani sanal enerji oluştuğu zaman, aksi işaretli bir başka sanal enerji de oluşmalı ki toplam enerji gerçel kalsın. Bu da, bir takiyonun daha oluşması demek. Yani takiyonlar, enerjileri sanal olsaydı, ancak çifter çifter oluşabilirlerdi. Herhalde yok oluşları da böyle olurdu...*

- Tezat gerektiğinde, ışıktan yavaş parçacıklara tardiyon ya da bradyon deniyor. Takiyon enerjilerinin sanal olması olasılığını biraz daha irdeleyelim... Tardiyon enerjileri gerçel olduğu ve gerçel ve sanal enerjiler ayrı ayrı korunacağı için, hiçbir zaman takiyonlarla tardiyonlar arasında enerji alışverişi olamazdı! Bu da böyle

takiyonların bizim tarafımızdan algılanamayacakları, bize hiçbir etkilerinin olmayacağı, yani “varlıkları ile yokluklarının bir olacağı” anlamına gelir. Bu durumda da, onları yok kabul edebiliriz.

- *Demek ki takiyonlar varsa, kütlelerini sanal kabul edebiliriz. Bunun başka ne sonuçları olur?*

- $E = \gamma mc^2$ denklemine bakarsak, takiyonların enerjileri azaldıkça hızlanmaları gerekir, hatta hızı azaltılıp ışık hızına yaklaştırılırsa, enerjileri sonsuza doğru artar. Yani tardiyonlar için ışık hızının üst sınır olması gibi, takiyonlar için de ışık hızının alt sınır olması gerekir.

Takiyonlar eğer yüklüyseler, ışıktan hızlı oldukları için, 25. Soru’da bahsettiğimiz Çerenkov ışınımı ile enerji kaybetmeleri gerektiği; hatta yüklü değilseler bile, Çerenkov ışınımının genelçekimsel benzerinin de benzer sonuca yol açacağı ileri sürülmüştür. Bu durumda enerji kaybeden takiyon, gittikçe hızlanır ve sonsuz hıza ulaştığında enerjileri biter, yani bir anlamda yok olur!

- *Çok garip...*

- Bence de... Ama bu Çerenkov ışınımı meselesi benim pek aklıma yatmıyor; çünkü ortam yok diye düşünüyorum... Hem bunların belki de çok önemi yok, çünkü ışıktan hızlı hareketin enerji veya momentum hesaplarının ötesinde, çok daha temel sorunları var.

- *O sorunlara geçmeden önce... $E = \gamma mc^2$’nin ve/veya -’nin olası ışıktan hızlı parçacıklar için doğru olacağını nereden biliyoruz?*

- Aslında bilmiyoruz. Ortada ışık hızı bir tür tekillik, yani bazı fiziksel büyüklüklerin sonsuz olduğu bir durum olarak dururken, hangi formüllerin bunun ötesinde de geçerli kabul edileceği çok açık değil.

Gelelim asıl soruna... **Işıktan hızlı gitmek, zamanda geriye gitmekle eşdeğerdir, dolayısıyla nedensellik ile çelişir.**

- *Nasıl?*

- Diyelim ki c’den büyük bir v hızıyla giden bir füzen var, bir A gözlemcisine göre, orijinden x yönüne ateşledin ve t kadar süre sonra, vt uzaklıktaki hedefi vurdun. Lorentz dönüşümlerini kullanarak (Soru 21) gösterebilirsin ki, c^2/v’den büyük (ama tabii hâlâ c’den küçük) bir hızla giden bir B gözlemcisi, hedefin vurulma zamanını negatif ölçer!

- *Yani B gözlemcisine göre, önce hedef yok oluyor, sonra füze ateşleniyor... Bir başka deyişle füze geçmişe gidiyor... Öte yandan, görelilik ilkesi bize B gözlemcisinin, A gözlemcisi ile aynı derecede haklı olduğunu söylüyor...*

- Ama B gözlemcisinin gözlemi, kabul edilemez, değil mi? Neden, sonuçtan sonra gelemez.

- *Demek ki başlangıç noktamız yanlıştı; c'den büyük bir v hızıyla giden bir füze olamaz. Çünkü her zaman o füzenin geçmişe gittiğini gözlemleyen bir başka gözlemci bulabilirim...*

- Ama füze yalnızca bir örnekti; aslında füze yerine herhangi bir etkiden bahsedebilirdik. Yani, bir "neden" ile bir "sonuç"u birbirine bağlayan çizgi, ışıktan hızlı giden bir nesneye karşılık geliyorsa, "neden"i "sonuç"tan sonra ölçen bir gözlemci bulunabilir; dolayısıyla (gözlemciler eşdeğer olduğuna göre) bu olaylar gerçekten "neden" ve "sonuç" olamazlar.

- *Bir başka deyişle, neden-sonuç ilişkisi, görelilik ilkesi (gözlemcilerin eşdeğerliği) ve ışıktan hızlı etkileşim bir arada olamaz.*

- Bu doğru; bunu söylemenin bir şekli de şu: İki olayın zamandaki sırası konusunda tüm gözlemcilerin söz birliği içinde olmasının şartı, bu iki olayı bağlayan çizginin, ışıktan hızlı olmayan bir sinyale eşdeğer olmasıdır. Bu da Lorentz dönüşümlerini kullanarak kolayca (Soru 21) gösterilebilir.

Bunu, iki noktayı ("olayı") ayıran dört boyutlu vektörün kendi ile iç çarpımı, yani 23. Soru'da da bahsettiğimiz "aralığın karesi" cinsinden de ifade edebiliriz:

İki olay arasındaki "aralığın karesi":

$$S^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 - c^2 T^2$$

Uzaysal aralık[46]: S^2 pozitif

46)İngilizce: Spacelike interval.

İki olayı andaş ölçen bir gözlemci bulunabilir,
ama aynı noktada ölçen bir gözlemci bulunamaz.

Zamansal aralık[47]: S^2 negatif

47)İngilizce: Timelike interval.

İki olayı aynı noktada ölçen bir gözlemci bulunabilir, ama andaş ölçen bir gözlemci bulunamaz.

Işıksal aralık[48]: $S^2 = 0$

48)İngilizce: Lightlike interval.

İki olayı ne andaş, ne aynı noktada ölçen gözlemciler bulunabilir. Bir olaydan diğerine bir ışık sinyali gidebilir.

Uzaysal, zamansal ve ışıksal aralık tanımlarının altlarındaki ifadeler de Lorentz dönüşümlerini kullanarak kolayca gösterilebilir. Bu tanımlar ışığında daha önce söylediğimiz bazı şeyleri yeniden ifade edebiliriz:

Kütleli cisimler uzay-zamanda zamansal (yani doğru olmadığı durumlarda bile her küçük parçası zamansal olan) yörüngeler izlerler.

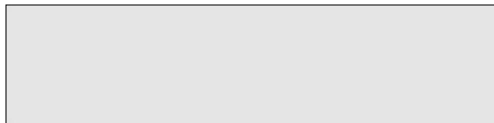
Kütlesi sıfır olan cisimler uzay-zamanda ışıksal (yani doğru olmadığı durumlarda bile her küçük parçası ışıksal olan) yörüngeler izlerler.

Takiyonlar uzay-zamanda uzaysal (yani doğru olmadığı durumlarda bile her küçük parçası uzaysal olan) yörüngeler izlerler.

Ve tanımlardan hemen önce söylediğimiz şey: İki olayın zamandaki sırası konusunda tüm gözlemcilerin söz birliği içinde olmasının şartı, bu iki olayın aralığının zamansal ya da ışıksal olmasıdır. Bu söz birliği de neden-sonuç ilişkisi için gerekli olduğuna göre,



Şekil 31. CERN’deki LHC tüneli. Özel göreliliğin her gün milyonlarca kez sınandığı hızlandırıcılara bir örnek.



Aralığı zamansal ya da ışıksal olan iki olay arasında neden-sonuç ilişkisi olabilir.

Aralığı uzaysal olan iki olay arasında neden-sonuç ilişkisi olamaz.

- Yani ışıktan hızlı hareket ya da iletişim, dolayısıyla takiyonların varlığı, aralarında neden-sonuç ilişkisi olamayacak olayları birbirine bağlardı. Bu yüzden bunlar olamaz diyorsunuz…

- Daha fazlası da var: Yukarıdaki füze hesabında yalnızca füzenin uzay-zaman orijininde ateşlenip, t anında vt uzaklıkta hedefi vurmasını kullandık; ama füzenin oradan oraya nasıl gittiğinin önemi yok! Örneğin, orijinde yok olup, (t, vt) uzay-zaman koordinatlarında ortaya çıksa—

- Ama bu zaten olmaz ki. Bir noktada yok olmak ya da başka bir noktada -hele bir müddet sonra- ortaya çıkmak, kütle/enerji korunumuna aykırı değil mi?

- Yok olmak ve tekrar ortaya çıkmak derken gerçek yok oluşu kastetmiyorum tabii. Bilimkurgu film ve kitaplarında, hatta ciddi bazı bilimsel makalelerde gördüğümüz "kurtdeliği"[49], "uzay-zaman tüneli" ya da "geçidi" gibi bir şeye girmek suretiyle kaybolmayı kastediyorum. Bu durumda deliğin veya tünelin veya geçidin içinde, ışık hızını geçmemekle beraber, yine de çok uzak bir mesafeye çok kısa zamanda gidebileceği iddia edilmektedir.

49)İngilizce: Wormhole. Bilimkurguda kullanımı için en önemli örnekler, A. C. Clarke'ın aynı isimli romanından sinemaya S. Kubrick tarafından uyarlanan *2001: Bir Uzay Destanı (2001: A space Odyssey)* ve C. Sagan'ın aynı isimli romanından sinemaya uyarlanan *Mesaj (Contact)*.

Böyle bir gidiş de aralarında neden-sonuç ilişkisi olamayacak olayları aynen takiyonlar gibi birbirine bağlardı; arada normal uzay-zamanda giden bir şey olmamasının önemi yok. Bu tabii, farklı bir boyut üzerinden geçiş, *Uzay Yolu* (*Star Trek*) dizisinin popülerleştirdiği "warp drive", yani uzay-zamanın kendisinde bir tür dalga oluşturup, bir sörfçünün okyanus dalgası tarafından taşınması gibi, o dalga tarafından taşınarak ışık hızını efektif olarak geçme türü fikir ya da fanteziler için de geçerli. Örneğin, sen uzay geminle kurtdeliğinden geçerek uzaysal bir aralığını kat edersen (yani normal uzay-zamandan gidersen, ancak ışıktan hızlı giderek ulaşabileceğin bir yer ve zamana ulaşırsan), bazı gözlemcilere göre uzay gemin delikten önce çıkıp, sonra girecektir; yani bir süre için evrende uzay geminden, dolayısıyla senden iki tane bulunacaktır.

- *Benden iki tane olması fena bir şey mi ki ? Şaka bir yana, madem gittiğim uzay-zaman noktasının başladığım ile aralığı uzaysal, benim "geçmişe gitmem"in bir sakıncası olmayabilir. Sorun, geçmişte eğer kendime bir şey yapıp şimdiki zamanı değiştirirsem oluşan çelişki değil mi? Burada geçmişe giden ben, geçmişteki bana bir şey yapamaz, çünkü çok uzak- o buraya gelene kadar, zaman şimdiki zamana ulaşır. Ne dersiniz?*

- Şimdi tam politikacılar gibi konuştun. Ne o, işine gelince, ben yasanın etrafından şöyle dolanayım, işine gelmeyince yasa izin vermiyor. Öyle şey olmaz. Sen eğer bir gözlemciye göre geçmişe gidebiliyorsan, yolda bir manevra yaparsın, bu kez orijinal olarak yola çıktığın koordinatlara göre geçmişe gidersin. Daha somutlaştırayım: Diyelim ki, ışıktan hızlı füzeni, senden ışıktan yavaş olarak kaçan bir hedefe doğru ateşledin. Ama hedef, füzeyi kendine göre aynı hızla geri döndürmeyi başardı. (Işıktan hızlı bir nesnenin geldiğini nasıl algılayacağı teknik sorusunu bir kenara bırakalım. Belki istihbaratı vardı, senin ateşleyeceğin zamanı biliyordu.) Hesabını şimdi göstermeyeceğim ama (aslında hesapta karekökten daha karmaşık bir şey yok), hedefin bazı hızları için, füze geri döndüğünde seni gelecekte değil, geçmişte vurur... Peki sen bundan bir yıl önce ölürsen, bugün füzeyi nasıl ateşleyeceksin?

- *Ya da şiddet içermeyen bir örnek düşünelim: Füze yerine benim ışıktan hızlı uzay gemim olsun, hedef uzak bir yıldız olsun, etrafında bir tur atıp geri geleyim, ben doğmadan önceki geçmişe dönüp, annem ile babamın karşılaşmasını engelleyeyim. Nasıl, çelişki güzel mi?*

- Harika. Geçmişe yolculuk hikâyelerinin temel sorunu olan "büyükbaba paradoksu"nu tanımladın.

- *Bu çelişkiden hiç mi çıkış yolu yok?*

- İki çıkış yolu var aslında. Ama biri nahoş, birinin de ne kadar anlamlı olduğu tartışılır...

Birinci açıklamaya göre, geçmişe yolculuklar, kırılmaz döngüler içerir. Yani olan değişemez, sen geçmişe gittiğin zaman annen ile babanın karşılaşmasını engelleyemezsin ya da çelişkinin orijinal ifadesindeki gibi, büyükbabanı öldüremezsin. Hatta, senin doğumun, gelecekten geri gelinmesine bağlı bile olabilir.

- *"Terminator" filmindeki gibi mi?*

- Evet. Ama o filmin geri kalanının bu yaklaşım ile tutarlı olup olmadığı belli değil pek.

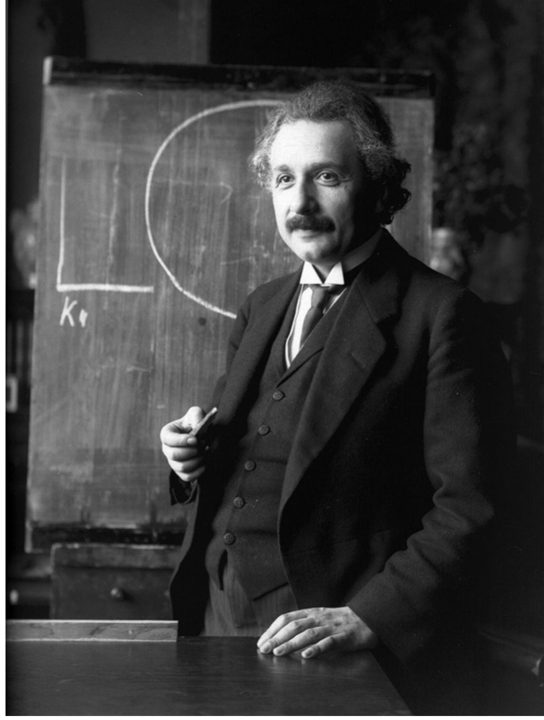
- *Bu nahoş yaklaşım mı, anlamlı olmayabilecek yaklaşım mı?*

- Nahoş. Çünkü "kader" sabit, irade yok, hiçbir şeyi değiştiremiyorsun aslında. Yani bu yaklaşıma göre *Terminator*'de Yokedici ve Reese gelecekten geldikten sonra, yapacakları her şey önceden belli; çünkü belli bir geleceği inşa etmek zorundalar. Yokedici Sarah Connor'ı öldüremez; Sarah ve Reese de Skynet'in oluşumunu engelleyemez.

- *Diğer çıkış yolu?*

- Bu yaklaşıma göre ise sonsuz sayıda gerçeklik var ve sen her eyleminle bulunduğun uzay-zaman noktasındaki sonsuz daldan birini seçiyorsun. Dolayısıyla, geçmişe gidersen sen oradan farklı bir gerçeklik yolunu takip edersin, ama bu da senin geldiğin gerçekliği değiştirmez. O bağımsız olarak var zaten.

- *Geçmişe yolculuğun tutarlı olması yalnızca bu iki şekilde mümkünse, Skynet neden geçmişe bir Yokedici yolluyor ki? Eğer "kader" yaklaşımı doğruysa, Yokedici'nin başarısız olacağı belli. Yok "sonsuz gerçeklikler" yaklaşımı doğruysa, Yokedici başarılı olsa bile,* ***başka*** *bir gerçeklikte John Connor olmayacak; Yokedici'yi gönderen Skynet'in gerçekliğinde bir şey değişmeyecek... Ya da bizim bilmediğimiz, ama Skynet'in bildiği bir üçüncü yol var.*



Şekil 32. Albert Einstein'ın 1921'de çekilmiş bir fotoğrafı.

- Sakin ol, bu bir film, filmler bilimsel olarak yüzde yüz tutarlı olmuyor genellikle. Ama *Terminator* "kader" yaklaşımına daha yakın galiba. Biraz Eski Yunan tragedyaları gibi; olacağı biliyorlar, olmasın diye uğraşıyorlar, ama kaderin gerçekleşmesine katkıda bulunmaktan başka bir şey yapamıyorlar. Yokedici'den geriye kalan parçaların incelenmesinden öğrenilenlerle Skynet'in temellerinin atıldığını ve John Connor'ın babasının gelecekten gelen adam olduğunu fark ettin, değil mi?...

Bir şey daha sorayım: Skynet ilk Yokedici'yi 2029'dan 1984'e yolluyor. Sonra ikinci filmde daha üst model Yokedici'yi neden 1995'e yolluyor? Neden onu da 1984'e yollamıyor?

Geçmişe yolculuk, kavramı, böyle tutarlılık sorunları ile dolu işte...

- *Bunun konumuzla ilgisi de, görelilik ilkesine göre eğer ışıktan hızlı gidilebilirse, geçmişe yolculuğun da (ya da mesaj göndermenin de) mümkün olması. Bu yüzden ışıktan hızlı gidebilecek nesneler olasılığına çok büyük şüpheyle bakıyoruz. Hiç mi açık kapı yok?*

- Yok gibi gözüküyor... Evrenin genel yapısı, genel görelilikle betimlenir; ama yerelde genel görelilik, özel göreliliğe indirgenir. Dolayısıyla takiyonlarla ilgili söylediklerim genelde de doğru. Geriye kurtdeliği türü, uzay-zamanı “çok-bağlantılı” yapan oluşumlar kalıyor. Ancak bunların da geçmişe yolculuğa eşdeğerliği, genel görelilikte de geçerli gibi görünüyor. Yani geçmişe yolculuğu içine sindirebilirsen, belki...

31-Özel göreliliğin öngörülerinin deneysel ispatı var mı?

- *Epey konuştuk, düşündük, akıl yürüttük... Ancak, özel göreliliğin söyledikleri, zaman genleşmesi, uzunluk büzülmesi, kütle-enerji dönüşümleri... Biraz sindirmesi zor. Peki deneysel ya da gözlemsel destek ne kadar var? İnsan yapısı araçların ışık hızının binde birine bile ulaşamadığını siz söylediniz 4. Soru’da; dolayısıyla ışık hızına yakın hızlardaki etkiler deneysel olarak incelenmiş olamaz, değil mi? Sakın yalnızca bir zihin cimnastiği yapıyor olmayalım?*

- Araçlar, yani kilolarca, hatta yüzlerce kilo kütlesi olan cisimler için haklısın. Ancak, örneğin bir elektronun kütlesi o kadar küçük ki, birkaç yüz bin voltluk bir gerilimden geçirerek ışık hızının hatırı sayılır bir kesrine çıkarılabilir ve hızlandırıcılarda ışık hızına çok daha yakın hızlara çıkartılıyorlar.

Soru 16’da zaman genleşmesinin örneği olarak kozmik ışınlar tarafından atmosferin üst tabakalarında oluşturulan müonların, çok kısa yarı-ömürlerine rağmen deniz seviyesinde tespit edilebilmelerini vermiştik. Kütle-enerji eşdeğerliği, daha doğrusu dönüştürülebilirliğinin örneği olarak da nükleer bombalar veya santraller var. Bunlar ilk anda akla gelenler...

Fakat, tabii ki asıl çarpıcı olan, hızlandırıcılarda olup bitenler. Deneysel parçacık fiziği diye bir dal olması, başlı başına kütle-enerji dönüştürülebilirliği sayesinde mümkün. Düşünsene, saniyenin trilyonda birinin milyarda biri içinde bozunan parçacıklar inceleniyor.

Bu kadar kısa ömürlü şeyler tabii ki doğada bulunamaz; deneyde o anda onları yaratmak gerekiyor.

- *Yoktan var etmiyoruz herhalde...*

- Tabii ki hayır. **Enerjiden** var ediyoruz. O protonları veya elektronları neden hızlandırıyoruz zannediyorsun?

- *Işık hızına yakın hızlarda incelemek için mi?*

- Bunu da yapabiliyoruz tabii; momentum denklemini teyit edebiliyoruz. Ancak, asıl amaç bu değil. Asıl amaç, onlara kinetik enerji kazandırmak... ki biz onları kafa kafaya çarpıştırıp da onlar “durunca”, bu enerji açığa çıksın. Çarpışmadan önce parçacıkların enerjileri parçacık başına γmc^2 idi; çarpışmada bir an mc^2'ye iner; işte bu farkın bir kısmı kütleye dönüşebilir. Çarpışma öncesi var olmayan parçacıkları, çarpışan parçacıklara daha önce vermiş olduğumuz enerjiden çarpışma anında yaratıyoruz işte böyle.

- *Hangi parçacıkların yaratılacağını ne belirliyor?*

- Şans! İki protonu çarpıştırdığında ne olacağını bilmiyorsun; ancak ne **olabileceğini** bilebilirsin. Yani belli kurallar çerçevesinde bir olasılık dağılımı hesaplayabiliyorsun, bu olasılıkların hangisinin gerçekleşeceği tesadüfe kalmış.

- *Tam aynı şekilde tekrar çarpıştırsam... aynı şey olmaz mı?*

- Bir kere protonun büyüklüğü 10^{-15} m, yani milimetrenin trilyonda biri; elektron ise noktasal ya da boyutunun hiçbir etkisini göremediğimiz kadar küçük. Bu kadar küçük şeyleri nasıl iki kez tam aynı şekilde hedefleyeceksin ki? Zaten yapsan bile sonuç olasılıklara kalmış; çünkü kuantum ilkeleri öyle diyor.

- *Ama bilimin dayandığı temel varsayım, tekrarlanabilirlik değil mi? Yani ben bir taşı bıraktığımda her zaman düşüyor...*

- 20. yüzyılda, doğanın tam da öyle olmadığını anladık. Bir olayın ya da deneyin sonucunu aslında kesin olarak öngöremiyoruz; ancak olasılıklar hesaplayabiliyoruz. Fakat, bazen bu olasılıklar yüzde 100'e ya da sıfıra ayırt edilemeyecek kadar yakın oluyor. Senin taş da böyle. Ve klasik fizik bu tür olayları kapsıyor. 20. yüzyıldan itibaren ise, olasılıkların daha ortalarda olduğu durumları incelemeye başladık; bu çalışmalardan da modern fiziğin iki temel direğinden biri olan kuantum fiziği doğdu. Diğer temel direk ise görelilik.

- *Bu parçacıkların bazıları hemen tekrar bozunuyorlar, değil mi?*

- Evet, kararsız olanlar daha düşük kütleli, ama kararlı parçacıklar artı enerjiye ya da saf enerjiye dönüşüyorlar. Bu da tabii kütle - enerji dönüşümüne bir örnek.

- *Enerji derken? Kinetik enerji olabilir mi örneğin?*

- Evet, tabii. Parçacıklar çarpışma noktasından uzaklaşırken, biz detektörümüzde yakalarsak, kararlı olanlar kinetik enerjilerini, kararsız olanlar tüm enerjilerini ısı olarak bırakıyorlar... Saf enerji derken ise genellikle fotonları (ışığı) kastediyoruz, ki bunun da enerjisini ısı olarak tespit edebiliyoruz.

Sonuç olarak, hızlandırıcılarda her saniye milyonlarca elektron ya da proton, binlerce tur atıyor; her parçacığın attığı her tur, özel göreliliğin momentum ifadesini tekrar tekrar test ediyor. Her saniyede yüzlerce-binlerce parçacık yaratılıyor; yaratılan her parçacık ve kararsız ise bozunması, kütle-enerji eşdeğerliğini tekrar tekrar test ediyor. Bu bozunma sürelerinin enerjiye bağımlılığının incelenmesi, zaman genleşmesini tekrar tekrar test ediyor. Ve özel görelilik, bütün bu testleri başarıyla geçti...

32-Einstein, göreliliği kaç yaşında, hangi ortamda geliştirdi?

- *Einstein, göreliliği geliştirdiğinde epey gençmiş, öyle mi?*

- Einstein, 1879'da Ulm'da (Almanya) doğdu. Konuşmaya biraz geç başlamış da olsa, zeki bir çocuk, başarılı bir öğrenciydi. 5 yaşında babasının hediye ettiği pusuladan çok etkilendi; esrarengiz bir kuvvet, o pusulayı nasıl tutarsa tutsun, iğneyi sürekli aynı yöne döndürüyordu: Demek ki hayatta görünenin ötesinde şeyler vardı... Haftada bir onlarla yemek yiyen fakir bir tıp öğrencisi, ona bilim, matematik ve felsefenin önemli bazı eserlerini gösterdi; örneğin 10 yaşında iken Öklid'in *Öğeler*'i (geometrisi) ve Kant'ın *Arı Usun Eleştirisi*'si ile tanıştı.

16 yaşında, bir elektromanyetik dalganın arkasından ışık hızıyla koşarsa ne göreceği konusunda kafa yoruyordu. Alman lise

sisteminin sıkı disiplinini boğucu bulduğu için lise diplomasını 17 yaşında İsviçre'den aldı ve orada üniversiteye başladı. 1900'de fizik ve matematik lisans derecesiyle mezun oldu.

İki yıl üniversitelerde iş aradı, bulamadı. Sonunda Bern'de patent inceleme memuru olarak çalışmaya başladı. Bu işi sırasında, kendi kendine hazırladığı teziyle doktora derecesini 1905'te aldı.

1905, Einstein'ın **mucize yıl**ıdır. ("*annus mirabilis*") Bu yıl içinde o zamanın en önemli akademik fizik dergisinde, dört makale yayımlamayı başardı. Makalelerin biri **Brown hareketi**ni, bir diğeri, **fotoelektrik olay**ı açıklıyordu, kalan ikisi ise özel görelilik üzerineydi. Bilimsel araştırma yapan herhangi birinin sana söyleyebileceği gibi, başlı başına bu bile büyük bir başarıdır; hele makale yazarının o sırada bir üniversite elemanı olmadığı düşünülürse. Fakat bunları büyük başarının ötesinde **mucize** kılan, bu makalelerin üç konuda devrimsel çalışmaların ürünü olmasıdır. Bunlar üç Nobel ödülü değerinde çalışma içeriyor demek bile, değerini yeterince belirtmiyor, şöyle ifade edeyim: Brown hareketi ve fotoelektrik olay makalelerinin her biri, Nobel fizik ödülü almış çalışmaların çoğundan daha önemlidir ve bence -pek kimsenin itiraz edeceğini sanmıyorum- özel görelilik ise, bu ödülü almış herhangi bir çalışmadan daha önemlidir.

Newton'un Woolsthorpe yıllarından beri (8. Soru) insanlık düşünce tarihi bir insanın bu derece üretken olduğu bir dönem görmemişti. Newton gibi, o da 20'li yaşlardaydı.

- *Eh, burada da saygıyla eğilmek lazım. Peki, aldı mı üç Nobel?*

- "Kuramsal fiziğe katkıları, özellikle fotoelektrik olay ile ilgili çalışmaları" için 1921'de Nobel aldı. Brown hareketinden neden bahsetmediler veya onun için başka bir yılda neden ödül vermediler, açıkçası bilmiyorum. Bu ikisinden daha devrimsel sonuçlar içermesine rağmen görelilik, o zamanki Nobel komitesinin anlayışına göre fazla kuramsal kalıyordu.

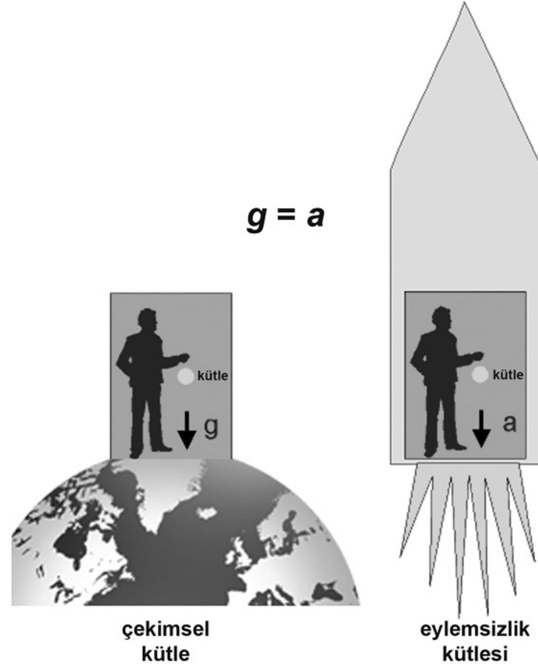
- *Nasıl yani?*

- Nobel Vakfı tüzüğü, ödüllerin "insanlığa fayda" getiren çalışmalara verileceğini söyler. "Fayda"nın ne olduğu biraz yoruma bağlı tabii; özellikle ilk 30-40 yılda yorum dar tutulmuş ve bu yüzden, kuramsal çalışmalara ödül verilmemiştir. Matematik için ödül olmaması da bir göstergedir.

- *Göreliliği zaten konuşuyoruz. Diğer iki konunun fiziğin genelindeki yeri ne?*

- Brown hareketinin anlaşılması, atomların varlığının gözlemsel desteğini oluşturur ve atom kavramının kabulünde önemli bir kilometre taşıdır. Fotoelektrik olayın anlaşılması, **foton** kavramını getirmiştir, dalgaların parçacık özellikleri de taşıdığını, yani enerjilerinin kesikli olduğunu gösteren ilk örnektir; kuantum fiziğinin gelişmesinde çok önemli bir aşamadır. Zaten Einstein'ın daha sonra da istatistik fizik, kuantum fiziği ve bunların arayüzünde epey önemli çalışmaları oldu.

- *Yani modern fiziğin bir önceki soruda bahsettiğimiz iki temel direğine de katkısı var.*



Şekil 33. Eşdeğerlik ilkesi: Dünya üzerinde (yani *g* şiddetinde bir genelçekim alanında) sabit durmak ile çekimsiz ortamda g ivmesi ile giden bir geminin içinde bulunmak, birbirinden ayırt edilemez.

- İki temel direkten göreliliği Einstein büyük ölçüde tek başına geliştirdi. Diğer temel direk olan kuantum fiziği ise çok sayıda fizikçinin işbirliği ile geliştirildi. Görelilik, tek bir dahi sanatçının

yaptığı şaheser bir tabloya, kuantum fiziği ise bir grubun birlikte dokuduğu şahane bir halıya benzetilmiştir. Einstein, kuantum fiziğinin gelişmesine katkıda bulunanların da -en azından erken dönemde- en önemlilerindendi. Ancak, önceki soruda bahsettiğimiz olasılık yorumunu bir türlü kabullenemedi; bunu "Tanrı zar atmaz" diye ifade etti ve hayatının son 30 yılını bu "belirsizlikleri" ortadan kaldıracak daha iyi bir kuram geliştirme hedefi peşinde geçirdi; hatta diyebiliriz ki, harcadı.

- *Peki görelilik üzerine 1905'ten sonra çalışmadı mı? Yoksa görelilik kuramının geliştirilmesini o yıl içinde tamamen bitirdi mi?*

- Söyleşimizde buraya kadar konuştuklarımızı, yani özel göreliliği 1905'te bitirmişti. Sonra genel görelilik üzerinde çalışmaya başladı; ona da son şeklini 1915'te verdi. (Aslında 1917'de bir değişiklik yapıp, 1929'da vazgeçti; konuşuruz.) Bu kurama dayanarak bir evren modeli yaptı, bu da modern kozmolojinin (evrenbilim) başlangıcıdır. 1919'daki Güneş tutulmasını gözlemleyen Eddington ve ekibi, Güneş'in yıldız ışığını genel görelilik ile tutarlı bir şekilde saptırdığını tespit ettiler; bu yolculuk, sonucu ve öngörünün kaynağı tüm dünya basınında yer alınca, Einstein'ın büyük şöhreti başladı.

- *Bize ne zaman geldi bu şöhret acaba? Malum, o yıllarda bizim derdimiz başımızdan aşkındı...*

Göreliliğin Türkiye'de yazılı olarak benim bildiğim en erken bahsedilişi, 1919'da Mehmed Âkif'in *Safahat*'ının altıncı kısmı olan "Asım"ın sonundadır.[50] Âkif 1916 yılında Berlin'e gitmişti, orada duymuş olabilir:

50)Daha ben öğrenciyken buna dikkatimi çeken Ömür Akyüz Hoca'ma özellikle teşekkür ederim.

Yarının ilmi nedir, halbuki? Gayet müdhiş:
"Maddenin kudret-i zerriyesi" uğraştığı iş.
O yaman kudrete hakim olabilsem diyerek,
Sarf edip durmada birçok kafa binlerce emek.
Onu bir buldu mu, artık bu zemin: başka zemin.
Çünkü bir damla kömürden edecekler te'min
Öyle milyonla değil, nâ-mütenâhi kudret!

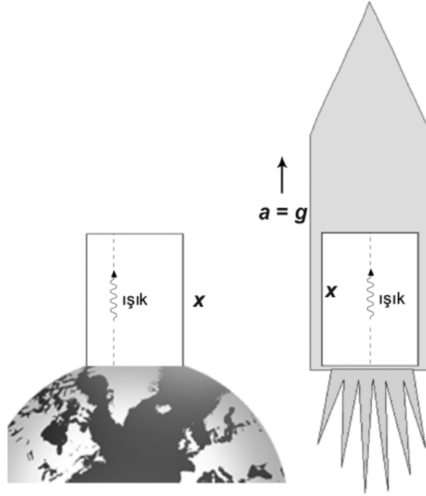
[kudret-i zerriye: zerrelerin (atomun ya da kütlenin) enerjisi (aslında "kudret" enerji demek değildir ama, o kadar kusura bakmayacağız);

nâ-mütenâhi: sonsuz]

5. Bölüm - EINSTEIN GENEL GÖRELİLİĞİ

33-Genel görelilik nedir? Özel göreliliğin nesi özeldi?

- *Hımm… Anlaşılan özel göreliliği bitirdik, genel göreliliğe başlayacağız... Peki, genel görelilik nedir? Bir diğer*



Şekil 34. Eşdeğerlik ilkesi ve çekimsel kırmızıya kayma: Sağ taraftaki asansör, boş uzayda g ivmesiyle yukarı doğru hızlanmaktadır. Asansörün tabanından tavanına bir ışık hüzmesi gönderilirse, tavanda frekans daha düşük algılanacaktır. Çünkü, ışığın tabandan tavana yolculuğu bir süre alacağından ve bu süre içinde asansörün hızı artacağından, tavanın ışığı aldığı andaki hızı, tabanın ışığı gönderdiği andaki hızından büyüktür; bu yüzden Doppler etkisi algılanan frekansı küçültecektir. Eşdeğerlik ilkesi, sabit ivmeyle hızlanan bir koordinat sisteminin sabit bir genelçekim alanına

eşdeğer olduğunu söyler. Dolayısıyla soldaki durumda, yani dünya yüzeyinde sabit duran bir asansörde de ışığın frekansının aynı miktarda azalmasını bekleriz.

deyişle, özel göreliliğin nesi özel?

- Koordinat sistemleri özel.

Şöyle ki, Soru 21'de de bahsettiğimiz gibi, özel görelilik, yalnızca eylemsiz koordinat sistemleri kullanır; hatta Lorentz dönüşümlerini gördüğümüz şekliyle kullanmak için, koordinat sisteminin ayrıca kartezyen olması gerekir. Genel görelilik ise, eğrisel koordinatlar dahil olmak üzere, herhangi bir koordinat sistemini kullanabilmemizi sağlar.

Özel görelilikten sonra Einstein'ın cevaplamak istediği soru, genelçekim kuramının nasıl değişmesi gerektiğiydi. Değişmesi neden gerekiyordu diye soracaksın, biliyorum; neden şu: Newton'un genelçekim yasasına göre, etki anlık olarak iletiliyordu. Soru 9'daki yasayı incelersen, herhangi bir gecikme etkisinden bahsettiğini göremezsin. Halbuki, özel göreliliğe göre hiçbir fiziksel etki ışıktan hızlı iletilemez. Bu çelişkinin giderilmesi gerekiyordu.

- *Çekim etkisinin anlık iletimi kavramına bir örnek verir misiniz?*

- Olmaz ama, Güneş'in bir anda yok olduğunu düşün. Eğer Newton genelçekimi doğru ise, yani anlık etki iletimi varsa, Dünya anında yörüngesinden çıkar. Özel görelilik ise, bu yok olmanın etkisinin en fazla ışık hızıyla iletileceğini, yani Dünya'nın Güneş yok olduktan sonra yaklaşık 8 dakika daha, Güneş varmış gibi aynı yörüngede devam etmesi gerektiğini söyler.

- *Ama bu, genelçekim yasasının ne olduğuna göre değişmez mi?*

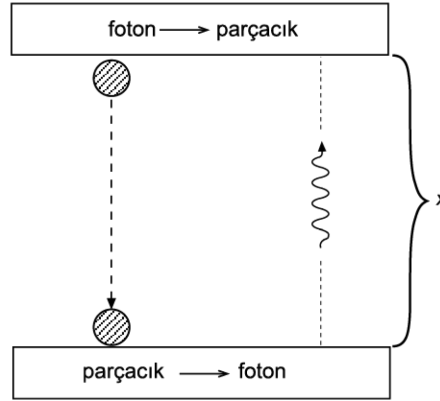
- Tam doğru ifade edemedim, **en az** sekiz dakika demem gerekiyordu; çünkü etki **en fazla** ışık hızıyla iletilebilir. Bunu söylemek için yasayı bilmek gerekmez; çünkü görelilik bir **ilkedir**, önem olarak yasaların üzerindedir.

- *Bu çelişkiyi ortadan kaldırmak için herhalde genelçekim değişmiştir. Adam özel göreliliği daha yeni geliştirmiş, onu değiştirmez herhalde...*

- Aslında özel görelilik değişiyor denemez, sınırları belirleniyor (Soru 4'ün cevabını tekrar okumak isteyebilirsin) ya da epey daha genel bir kuramın bir özel hali olarak anlaşılıyor. Biraz ileride anlayacağın gibi, kartezyen koordinatlar düz uzay-zamanı betimler;

yani özel görelilik, düz uzay-zamandaki fizik için geçerlidir. Einstein, konuşacağımız düşünce deneyleri ve gözlemler ile düz uzay-zaman ile genelçekimin uyumsuz olduğuna karar verdi. Yani uzay-zamanın eğri olması gerekiyordu. Bu da bizi eğrisel koordinatlar kullanmaya zorlar, çünkü eğri uzay-zaman kartezyen koordinatlarla betimlenemez.

Öte yandan, uzay-zaman ne kadar eğri olursa olsun, yeterince küçük ölçekte düz gibi düşünülebilir. Dünya yüzeyindeyken dünyanın düz görünmesi gibi. Dolayısıyla yerelde özel görelilik geçerlidir. Ancak, eğrilikten dolayı, bir

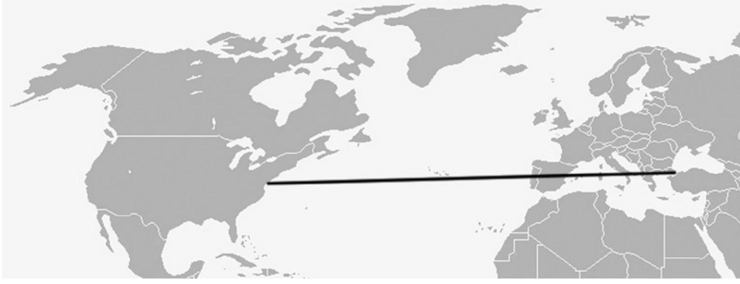


Şekil 35. Çekimsel kırmızıya kayma için alternatif düşünce deneyi: *g* şiddetindeki çekim alanında bir foton yukarıya tırmanmaktadır. *x* yüksekliğine geldiğinde, foton bir makineye çarpar ve makine onun tüm enerjisini kütleye dönüştürerek bir parçacık üretir. Dolayısıyla bu parçacık o noktada durağandır ve kütlesi $m = hf/c^2$ olur. Tabii ki parçacık çekim alanı içinde düşmeye başlar. *x* kadar düştüğünde, ilkinin tersini yapan bir makineye çarpar ve bu makine de onun tüm enerjisini kullanarak yukarı yönelik bir foton üretir, böylece döngü yeniden başlar.
Ancak, parçacığın kinetik enerjisi aşağıda, yukarıdakinden *mgx* kadar fazla olduğuna göre (parçacığın hızı düşük olduğundan, klasik formülleri kullanabiliriz), fotonun yukarı çıkarken kinetik enerji kaybetmesi gerekir. Eğer kaybetmezse, her turdaki foton enerjisi, bir öncekinden *mgx* kadar fazla olur, yani yoktan enerji üretmiş oluruz!

yerel gözlemcinin (burada artık koordinat sistemini değil, bir kişiyi ya da ölçüm aletini kastediyoruz) düz harekete başladığını gördüğü bir cisim, biraz gidince "yön değiştirebilir", çünkü yerel gözlemcinin kartezyen koordinat sistemi uzaklara gittikçe, tabiri caizse sapıtabilir.

Bir yaprak kâğıda bir koordinat sistemi çizip kâğıdı bir portakala sardığını düşün. Bir tarafını buruşturmadan yapamazsın.

Einstein, bu yön değiştirmelerin genelçekim etkilerinden ayırt edilemeyeceğini anladı. Bunun doğal sonucu da



Şekil 36. İstanbul, New York ve ikisini bağlayan doğu-batı yönündeki yol. Ama uçaklar böyle gitmez.



Şekil 37. Tipik bir İstanbul - New York uçak rotası.

genelçekim diye düşündüğümüz olgunun, uzay-zamanın geometrik özelliklerinin bir sonucu olduğudur.

- *Bu geometrik özellikler nereden geliyor?*

- Haklısın, kuramı tamamlamak için, bunun yasalarına da ihtiyacımız var. Kısa cevap, madde tarafından büyük ölçüde belirlendiği. Sonuçta Newton'un genelçekim kuramında da bir kütleyi etkileyen çekim alanı, etraftaki diğer kütleler, onların dağılımları ve mesafeleri cinsinden verilmiyor mu?

Ancak, burada iş biraz daha karışık. Kütle dağılımı tek başına belirleyici olamaz, çünkü kütle ve enerji eşdeğer. O zaman

kütle+enerji dağılımı lazım. Ama salt o da olamaz, çünkü bir koordinat sistemindeki enerji, bir başka koordinat sistemindeki momentuma katkıda bulunuyor. Bazı (şimdi girmeyeceğim) matematiksel nedenlerden dolayı, basınç ve benzer büyüklükler de giriyorlar işin içine.

Sonuç olarak, geometriyi belirleyen yasalar, 10 adet birbirine bağlı, doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denkleme[51] karşılık gelir. Bu denklemlerin bir tarafı (genellikle “sol taraf” denir) uzay-zamanın geometrik özelliklerinin fonksiyonlarıdır; karşı taraf ise, maddenin 10 farklı özelliğinin (kütle-enerji, momentum bileşenleri, vb.) uzay-zamandaki dağılımlarıdır. “Einstein denklemleri” denen bu denklemler genel halde son derece karmaşıktırlar [52]; o kadar ki, Einstein bunları 1915’te geliştirdiğinde, ömrü boyunca çözüm bulunamayabileceğini düşündüğünü söylemiş; yılın sonunda ilk çözüm bulununca epey şaşırmıştır. Tabii bazı özel hallerde, denklemler epey basitleşebilmektedir.

51)Buna karşılık olarak Newton genelçekim kuramında, bir kütle dağılımının oluşturduğu çekim alanını veren yasa, bir adet doğrusal kısmi diferansiyel denkleme; klasik elektromanyetizmayı betimleyen Maxwell yasaları sekiz adet birbirine bağlı doğrusal kısmi diferansiyel denkleme karşılık gelir.

52)Einstein denklemlerinin en ayırıcı özelliği ve onları Maxwell denklemlerinden çok daha zor/karmaşık yapan, doğrusal olmamalarıdır.

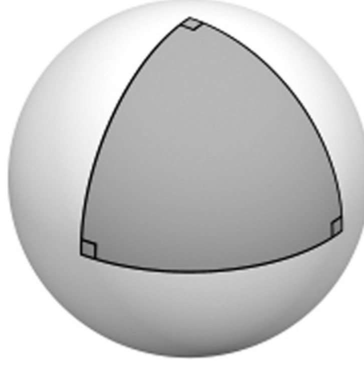
Yani geometriyi maddenin 10 farklı özelliğinin dağılımları büyük ölçüde belirler.

- *Neden “büyük ölçüde”?*

- Çünkü madde olmadığı durumda bile, çok karmaşık çözümler bulunabiliyor. Bunlara boşluk (vakum) çözümleri diyoruz. Sonuçta, boşlukta da çekim varolabiliyor; yani uzay-zamanın geometrisi basit olmayabilir, değil mi?

Özetlersek, genel görelilik, hem eğrisel koordinatlarda ve/veya eğri uzay-zamanlarda fizik yasalarını kullanmanın bir yoludur, hem de bir genelçekim kuramıdır; üzerine başka bir kuvvet etki etmeyen cisimlerin hareketlerini, içinde bulundukları uzay-zamanın geometrik özellikleriyle açıklar. Bu geometriyi de “Einstein denklemleri” aracılı

ğıyla varolan madde belirler.



Şekil 38. Küre üzerinde bir üçgen.

34-Eşdeğerlik ilkesi nedir?

- *Özelde ışığın hızının, genelde doğa yasalarının hepsinin tüm eylemsiz gözlemciler için aynı olması, özel göreliliğin çıkış noktasıydı. Genel görelilik için de benzer şekilde kolayca ifade edilebilen bir çıkış noktası var mı?*

- Genel göreliliğin çıkış noktasına “eşdeğerlik ilkesi” deniyor. Bu ilkenin ilk şekli, bilimsel yöntemi yerçekimine uygulayan ilk kişi olan Galileo’nun gözlemine kadar gider—

- *Gene mi Galileo?*

- İlginç, değil mi?.. Galileo, tüm cisimlerin (hava direnci ihmal edilebildiğinde) aynı şekilde ve sabit ivme ile düştükleri gerçeğini gözlemlemişti. Bu da ancak, - ve $F = mg$ denklemlerindeki[53] m’lerin birbirlerini sadeleştirmeleriyle mümkün. Aslında bunlar aynı olmayabilirdi; -’daki m, cismin eylemsizlik özelliğinin ölçüsüdür; $F = mg$’deki m ise cismin çekim alanı oluşturma ve başka bir cismin çekim alanından etkilenme özelliklerinin ölçüsüdür; birinciye **eylemsizlik kütlesi** (eski dilde: atalet kütlesi), ikinciye de **çekimsel kütle** denir. Bu ikisinin eşitliği, hatta özdeşliği eşdeğerlik ilkesinin ilk şeklidir:

53)Tabii ki bu ikinci denklemi de vektör olarak yazmak gerek.

Eşdeğerlik ilkesi (Galileo versiyonu): Bir cismin eylemsizlik kütlesi ile çekimsel kütlesi özdeştir.

- *Bu aynı şekilde ve sabit ivmeyle düşme özelliği ne kadar iyi sınandı? Galileo'nun deneyleriyle kalmamıştır herhalde…*

- Aslında bu işin deneyleri, cisimler düşürülerek değil, sarkaç veya benzeri salınan sistemler incelenerek yapılıyor; böylece gözlem süresi uzatılarak deneyin duyarlılığı arttırılmış oluyor. Bunların tarihsel olarak en önemlisi, Macar fizikçi Eötvös tarafından 1906-1909 arasında yapıldı ve bu eşitliğin çok farklı kimyasal bileşimlere sahip cisimler için yedi hanelik duyarlılıkla sağlandığı bulundu.

- *Bu özdeşliğin önemi ne?*

- Bu özdeşliğin, sabit ivmelenen koordinat sistemleriyle ilgili ilginç bir sonucu var: Diyelim ki Soru 2'deki tren bu kez sabit hızlı olmasın da sabit ivmeyle hızlansın, ama çoban hâlâ eylemsiz olsun, gözlemlenen cisim de karga olsun. Trenin çobana göre ivmesi a_1, karganın trene göre ivmesi a_2 ve çobana göre ivmesi a olsun. Bu durumda $a = a_1 + a_2$ geçerlidir. Bunu anlamak için Soru 10'daki Şekil 15'i takip eden akıl yürütmeleri, *u*'nun sabit olmayıp, sabit ivmeye sahip olması durumu için tekrarlayabiliriz; bağıntımız ivmelerin bir boyutta olmayıp, üç boyutlu vektörler olmaları durumunda da geçerlidir.

Şimdi, Newton'un ikinci yasası çobanın sisteminde geçerli olduğuna göre, -. Ancak, bu yasa makinistin sisteminde geçerli değil, çünkü - değil. Makinist a_2 ivmesini ölçüyor, unutma. Ya ne geçerli? -. Yani makinist Newton'un ikinci yasasını kullanmakta ısrar ederse, -'lik bir ek kuvvet gözlemlediğini söylemek zorundadır. Bunlar, Soru 11'de de bahsettiğimiz sanal kuvvetler.

- *Niye illa Newton'un ikinci yasasını kullanacağım diye ısrar etsin ki?*

Bir kere, eylemsiz olmadığının farkında olmayabilir, örneğin penceresiz bir vagonda... İkincisi, hangi yasayı kullansın? Newton'un ikinci yasasını öğrenmişiz; ivmelenince yasayı değiştirmektense, yeni bir kuvvet düşünmek daha kolay. Üçüncüsü, yasayı "kullanmak" için illa denklem yazmamız gerekmez, bir ölçüde bu yasaları içselleştirmişizdir. Örneğin serbest vuruş kullanacak futbolcu, cebinden kâğıt-kalem ya da hesap makinesi çıkarıp, topun barajın üstünden aşarak kale direğinin altından geçmesi için gereken vuruş

açısını ve hızını hesaplamaz; kendi vuruşu ile topun hareketi arasındaki ilişkiyi içselleştirmiştir. Zaten hesaplanmış olsa da, doğru yön ve hızda vurmak da ayrıca marifet ister. Benzer şekilde, gördüğümüz ivmeleri toplam kuvvet ile otomatik olarak ilişkilendiririz; yani yine Newton'un ikinci yasasını kullanmış oluruz...

Ancak, bu ek kuvvet, *m* ile orantılı! Genelçekim alanı gibi... Yani, örneğin yeryüzünde aşağıya bakan - vektörüne, - vektörü eklenmiş gibi. Ya da eylemsiz gözlemcimiz uzayda, her şeyden uzakta, "çekimsiz ortamda", ivmeli gözlemci de aynı bölgede, ama sabit ivme ile hareket eden bir uzay gemisinin içinde olsun... İvmeli gözlemci, tüm cisimlere etki eden, kütle ile orantılı bir kuvvet gözlemler. Ama bu, genelçekim kuvvetinin tarifiyle aynıdır! (Şekil 33)

Eşdeğerlik ilkesi: (Eylemsiz bir koordinat sistemine göre) Sabit ivmelenen bir koordinat sistemi ile sabit bir genelçekim alanı birbirlerinden ayırt edilemez.

Örneğin, bindiğin asansör yukarı ivmelenmeye başladığında, kendini daha ağır hissedersin. Sanki yerçekimi kuvvetlenmiş gibi...

- *Hatta ivmelenen asansördeki her türlü hesabı, sanki yerçekimi ivmesi a kadar artmış gibi yapabiliyoruz.*

- Peki, asansör aşağı ivmelenirse, hele bunu *g* ivmesiyle yapar, yani düşerse?

- *Bu kez yerçekimi ivmesi a kadar azalmış gibi hesap yaparız; eğer asansörün aşağı ivmesi g ise, asansör yerçekimsiz bir ortam gibi olur!*

- Evet! Demek ki koordinat sistemimi değiştirince, genelçekim yok oluyor![54] O zaman pek de gerçek bir kuvvet olamaz, değil mi?

54)Bilimsel araştırma ya da film çekimi amaçlı olarak, çekimsiz ortam, bu şekilde "serbest düşme" hareketi yapan uçakların içinde yaratılıyor; tabii ki en fazla 90 saniye kadar süreler için.

- *Bir yerden atlarsam yere düşüyorum ama. Bana bayağı gerçek gibi geliyor.*

- Etrafına bakmadan, örneğin kapalı bir kutu içinde düşersen; düşüyor musun, yoksa uzayda mısın, ayırt edemezsin; tabii yere çarpana kadar. Bu süre içinde, üzerine kuvvet etki etmediğini varsayma hakkın var...

Şimdi, ilkenin (eylemsizlik kütlesinin çekim kütlesine eşit olması şekliyle) sonuçlarını biraz daha öteye götürelim: Demek ki cismin gelecekteki hareketi, ne olduğuna bağlı değil... Peki neye bağlı olacak? Ne kaldı? "Şimdiki zaman"daki hareketine, yani ilk hızına—

- *Bu Newton mekaniğinde de böyleydi*—

- Ve **nerede** olduğuna bağlı. Nerede derken, yalnızca uzayda değil, uzay-zamanda nerede? Yani cismin kendi özelliklerine bağlı değil, uzay-zamanın yerel özelliklerine bağlı... Ama uzay-zamanın yerel özellikleri geometrisidir!

- *Neden öyle olsun? Uzay zamanda koordinatların fonksiyonu olan bir alan vardır belki, o cisme bir kuvvet etki ettiriyordur... Örneğin elektrik alan. O geometridir diyor muyuz?*

Demiyoruz[55], çünkü elektrik alan elektronu farklı hareket ettiriyor, pozitronu farklı, protonu farklı, nötronu farklı, bir uzay gemisini farklı. Ama "genelçekim" bunların hepsini aynı şekilde hareket ettiriyor. Bu bir kuvvet alanı ise, neden bu kuvvet bu özelliğe sahip olsun, yani kütle ile orantılı olsun? Her zaman için bu etkiyi uzay-zamana atfedebiliriz...

55)Aslında (22. Soru'da konuştuğumuz gibi) ek-boyutlu kuramlarda bu bir ölçüde yapılabiliyor.

- *Peki bu ilkenin basit bir sonucu var mı?*

- Şekil 34'e bak... Sağ taraftaki *g* ivmesiyle yukarı hızlanan asansörde, tavanın ışığı aldığı andaki hızı, tabanın ışığı gönderdiği andaki hızından büyüktür. Dolayısıyla, Doppler olayı yüzünden algılanan frekans, yollanan frekanstan küçük olacaktır.[56]

56)Merak edenler için, bu kaymanın hesabı şöyle: Işığın asansörü geçme süresi: $t \approx x/c$. Bu süre içindeki hızlanma: $v \approx gx/c$ ($v<<c$ için). Bu bağıl hızın yol açtığı Doppler kayması: - (Soru 25). Buradan da, yine $v/c<<1$ kullanarak, - buluruz.

Eşdeğerlik ilkesi, bize **bu durumun soldaki duruma eşdeğer** olduğunu, dolayısıyla bir genelçekim alanında yükselen ışığın frekansının düşeceğini söylüyor. Bu etki gözlemlenebiliyor ve **çekimsel kırmızıya kayma**[57] deniyor.

57)Tabii ki ters yönde maviye kayma olacaktır, ama genellikle böyle adlandırılıyor. Bazen de (hız ile bir ilgisi olmadığı halde) **çekimsel Doppler kayması** deniyor.

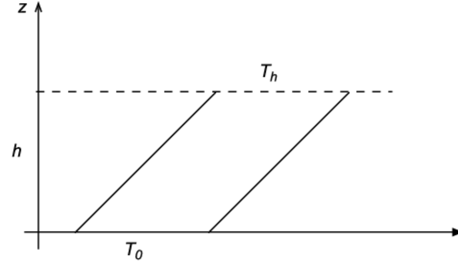
- *Nitelik olarak tamam; ama nicelik olarak? Frekans kayma miktarının iki durumda aynı olduğunu da söylüyor mu ilke?*

- Kaymanın olacağını zaten bize eşdeğerlik ilkesi söylüyor. Görelilik öncesi kuramlarda zaten ışığın çekimden etkilenmesi için bir sebep yok ki...

- *Aslında özel görelilik bize enerjinin kütleye eşdeğer olduğunu söylemiyor mu? Işık da enerji taşıdığına göre genelçekimden etkilenmesini beklemez miyiz?*

- Doğru. Hatta özel görelilik bize ipucu verir: Lorentz dönüşümü yapıldığında, elektromanyetik dalgaların frekans ve enerjileri aynı şekilde dönüşür. Kuantum fikirleri ve foton kavramı da gelince, h Planck sabiti olmak üzere, fotonlar için $E = hf$ ve $E = mc^2$ bağıntıları kullanılarak da bu kayma anlaşılabiliyor.[58]

58)Yine merak edenlere: Fotonun kinetik enerji değişimi: -. Buradan, -.



Şekil 40. Çekimsel kırmızıya kayma ve uzay-zaman geometrisi: İki diyagonal çizgi, *h* yüksekliğine tırmanan iki ardışık ışık atmasıdır. Oluşan paralelkenarın alt kenarı, ışığın alçaktaki periyodu, üst kenarı da *h* yüksekliğindeki periyodudur; çekimsel kırmızıya kayma bunların eşit olmadığı anlamına gelir! Karşılıklı kenarları eşit olmayan bir paralelkenar, düz uzayda mümkün değildir, ancak eğri uzayda var olabilir.

- *Öte yandan, Soru 28'de, bir sistemin genelçekimsel özelliklerinin tek bir rakamla ifade edilemeyeceğini söylemiştik. Dolayısıyla, fotonun "genelçekimsel kütle eşdeğeri"nin E/c^2 olduğu ne malum?*

- Yine doğru. Ama alternatif bir düşünce deneyi ile, kütle-enerji eşdeğerliğini hiçbir belirsizliğe meydan vermeyecek şekilde kullanarak da aynı sonucu çıkarabiliriz. Bu deneyde, fotonu bir parçacığa ve aynı parçacığı fotona geri dönüştürebilecek bir "makine" da düşünmemiz gerek.· (Bkz. Şekil 35.) Bu düşünce

deneyinin[59] güzel tarafı, özel görelilikte aslında varolmayan “fotonun genelçekimsel kütle eşdeğeri” kavramını kullanmamızın gerekmemesidir.

59)Bir önceki hesabı aynen tekrar edebiliriz; ancak kullandığımız kütle, daha güvenilir.

35-Nasıl? “Genelçekim kuvveti” aslında yok mu?

- *Eşdeğerlik ilkesinin ana sonucu, genelçekimin aslında geometrinin sonucu olduğu, gerçek bir kuvvet olmadığıdır dediniz. Bunu biraz açar mısınız? Yani “genelçekim kuvveti” aslında yok mu?*

- Yine bir örnek vereyim. Hiç ABD’ye uçtun mu? Ya da bir tanıdığın uçtu mu? İstanbul’dan ABD’ye giden uçakların büyük çoğunluğu New York’a uçar ve İstanbul ile New York yaklaşık aynı enlemdedir. Yani İstanbul’dan sürekli tam batıya giderek, Şekil 36’daki gibi, New York’a ulaşabilirsin... Ama uçaklar bu yolu takip etmezler, Şekil 37’deki gibi uçarlar... Sence neden?

- *Okyanus üzeri uçuşu mümkün olduğu kadar kısaltmak, yani okyanusu en dar yerinden geçmek için olabilir mi?*

- Hiç fena değil... Ama dikkat et, okyanus üzerindeki kesim de eğri görünüyor...

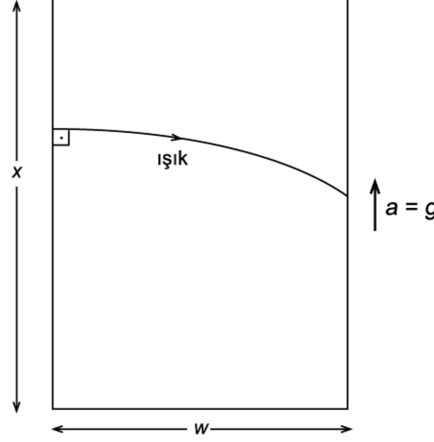
- *“Görünüyor” dediğinize göre, az sonra aslında eğri olmadığını söyleyeceksiniz herhalde...*

- Bir bakıma öyle... Şekil 37’deki yol, İstanbul-New York arasındaki en kısa yoldur. Dünyanın yüzeyi düz olmadığı için, şekiller yanıltıcı oluyor. Eline bir dünya küresi alıp, İstanbul-New York arasına bir ip gerersen, en kısa yolun İngiltere-İrlanda-İzlanda üzerinden geçtiğini görebilirsin.

- *İki nokta arasındaki en kısa yol, bir doğru değil midir?*

- Evet, düz uzayda öyle... Ama dünya yüzeyinde aynı tanım meridyenler, ekvator ve Şekil 34’teki gibi yollar için geçerli. Ve bu tanımdan daha iyisi yok. Dolayısıyla bu çizgiler, dünya yüzeyinin oluşturduğu iki boyutlu uzayın “doğru”larından...

Ancak, konumuzla ilgili can alıcı nokta şu: Şekil 36-37'deki tür bir harita (koordinat sistemi) üzerinde bakınca, uçak mümkün olan en "doğru" yolu izlediği halde, sanki uçağı ekvatora doğru çeken bir kuvvet varmış gibi uçağın enlemi önce büyüyor, sonra küçülüyor...



Şekil 41. Eşdeğerlik ilkesi ve ışığın bir genelçekim alanında sapışı.

Soru 22'de, özel görelilikte üzerine kuvvet etki etmeyen cisimlerin uzay-zamanda birer doğru boyunca, yani iki noktayı bağlayan en kısa yol üzerinde hareket ettiklerini konuşmuştuk. **Eğri uzay-zamanda da bu geçerlidir**, ancak bu en kısa yollar, bizim kullandığımız koordinat sistemlerinde, sanki bir kuvvet etkisindeymiş gibi görünebilir.

- *Koordinat sistemimizi değiştirelim o zaman...*
- Eğri bir uzay-zamanı kapsayacak eylemsiz, yani kartezyen bir koordinat sistemi bulunamaz ki...

36-Eğri uzayın düz uzaydan farkları nelerdir?

- *Eğri uzay derken tam olarak ne kastediyoruz? Düz uzaydan farkı ne?*

- Önce düz uzayın ne olduğunu söyleyeyim: Öklid geometrisinin geçerli olduğu uzay. Yani üçgenin iç açıları toplamı 180°, paralel doğrular kesişmiyor filan. Eğri uzay ise bu özelliklerden en az birini ihlal eden uzaylara deniyor.

- *Nasıl yani? Bir üçgenin iç açılarının toplamı zaten her zaman 180° değil mi?*

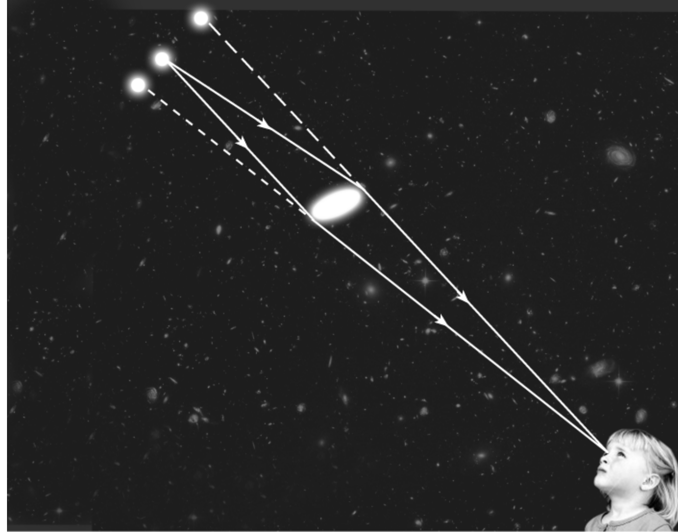
- Düz uzayda evet. Eğri uzayda şart değil. Örneğin dünya üzerine bir köşesi kuzey kutbunda, bir köşesi yaklaşık Ekvador'da, bir köşesi yaklaşık Gabon'da olan Şekil 38'deki gibi bir üçgen çiz. Bunun üç iç açısı da 90°, dolayısıyla toplamları 270 derecedir.

- *Ama o bir üçgen değil ki! Yamuk yumuk bir şey...*

- Üçgeni bir tanımlar mısın?

- *Hımm... Sanırım, birbiriyle kesişen üç doğrunun sınırladığı alan...*

- Tamam işte... Ekvator ve iki meridyen senin üçgeninin sınırları... Bir önceki soruda, "doğru" tanımının küre yüzeyinde bu eğrileri verdiğini hatırla... Aslında "doğru" kavramını yalnızca düz uzayda kullanıp, herhangi bir uzayda aynı tanımı uygulayarak elde ettiğimiz yollara (eğrilere) **jeodezik** diyoruz. Dolayısıyla doğrular, düz uzayların jeodezikleri oluyor



Şekil 42. Güçlü mercekleme. Bu örnekte, uzaktaki kuasarın iki görüntüsü görülüyor.

Sonuç olarak yukarıda tarif ettiğim üçgen, küre yüzeyi için gayet geçerli bir üçgen, ancak iç açılarının toplamı 180°'den büyük! Ayrıca, küre yüzeyinde paralel doğrular da kesişebiliyor: İki komşu meridyenin ikisi de ekvatora dik olduğundan, ekvator civarında paralel kabul edilebilirler. Ancak, bunlar kutupta kesişir. Bu iki özellik, küre yüzeyinin eğri bir uzay olduğunu işaret ediyor.

- *Eh, aslında eline alınca gayet güzel görülebiliyor eğri olduğu... Küre, silindir...*

- Hayır! Silindir eğri değil!

- *Nasıl yani?*

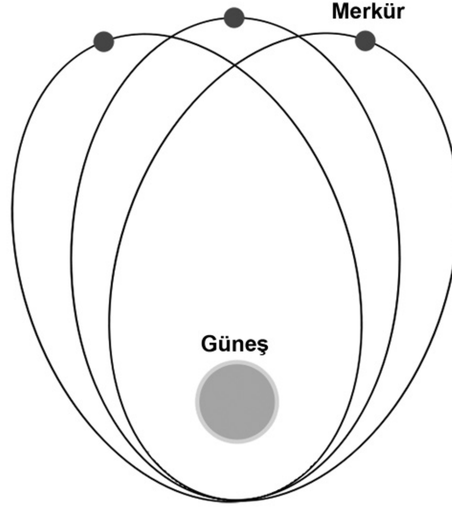
- Önemli olan iki boyutlu yüzeyin üç boyut içine nasıl yerleştiği (teknik deyimle **gömüldüğü**) değil; Öklid geometrisinin kurallarını sağlayıp sağlamadığı. Yani üçgenlerin açıları, dairelerin alanları, doğruların paralellik ilişkileri vb. düz uzay gibi mi? Silindir yüzeyi için bunların hepsi doğru.

Bu konuda düşünmenin bir şekli de, söz konusu uzayla kartezyen koordinatlı bir uzay arasında her bakımdan (yani alanlar, açılar...) bire bir eşleme yapılıp yapılamayacağını düşünmek. İki boyut için bunu kolayca hayal edebiliriz: Bir kâğıdı bu yüzeye buruşturmadan sarabiliyor musun, saramıyor musun? Çeşitli eşyaları paket yaparken bunu fark etmişsindir…

- *Silindire sararım, küreye saramam... Sanırım yufka açılırken, yufkanın merdaneye sarılması da benzer bir örnek.*

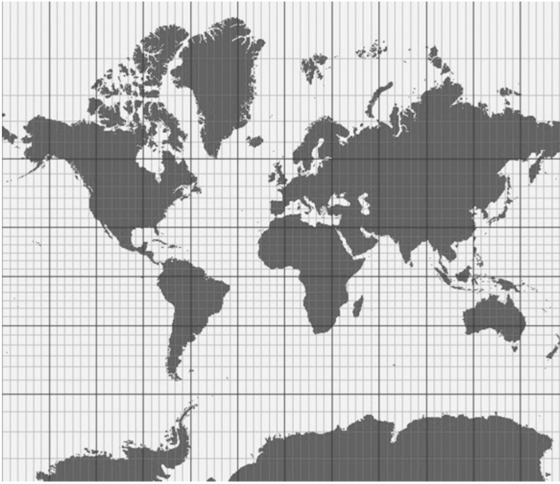
- İşte o kâğıda çizdiğin herhangi bir şekil, düz uzay kurallarını sağlar; onu silindire sarınca hiçbir şey değişmez; ne açılar, ne yüzölçümleri … Ama bir küreye kâğıdı aynı şekilde saramazsın; ancak kâğıt yerine yine düz, ama elastik bir kumaş ile başlarsan, bazı yerlerini gerip uzatarak kumaşı küreye giydirebilirsin. Ancak, bu gerdirmeler, uzatmalar, yüzölçümlerini ve/veya açıları bozar.

Bunun tersi de geçerlidir. Kürenin yüzeyini düz bir zemine sermeye çalışırsan da bazı yerleri germek, bazı yerleri büzmek zorunda kalır; yine yüzölçümlerini ve/veya açıları bozarsın. Harita yapmak tam da budur, yani küresel dünya yüzeyini düz kâğıda -bir ölçekle çarparak- ser



Şekil 43. Merkür'ün günberisinin hareketi. Gezegen yörüngeleri Kepler'in elipslerinden çok küçük sapmalar gösterir. Yörüngenin eliptikliği ve özellikle turdan tura günberi ve günötenin değişimi, gözle fark edilebilmeleri için abartılı olarak çizilmiştir.

mek; bu yüzden hiçbir harita doğru bir temsil olmaz, örneğin bir Mercator haritasında, Şekil 39'a bak, Grönland, Afrika'dan büyük görünür.



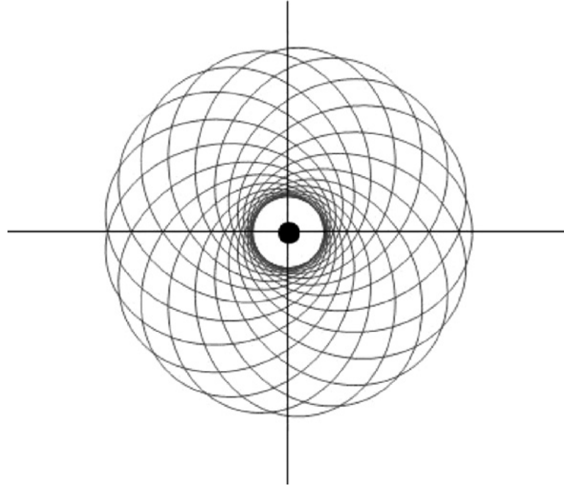
Şekil 39. Mercator projeksiyonu ile yapılmış bir dünya haritası. 2 milyon km^2'lik Grönland'ın 30 milyon km^2'lik Afrika'dan büyük görünmesine dikkat edin. Bu veya benzeri gerçekdışılıklar, düz olmayan küre yüzeyinin düz kâğıda tüm özelliklerini koruyarak aktarılamamasının bir sonucudur.

Sonuç olarak silindir yüzeyindeki geometrik ilişkiler düz kâğıt ile tamamen aynıdır, dolayısıyla silindir yüzeyi (her ne kadar daha yüksek boyutlu uzayın içine eğri olarak yerleşmiş ise de) düzdür deriz. Kürenin yüzeyinde ise, geometrik ilişkiler düz kâğıttakinden farklı, o yüzden küre eğri bir (iki boyutlu) uzaydır.

Tekrar vurgulamak istiyorum, yüzey içindeki geometrik ilişkiler önemli, üçüncü boyuta çıkmak gerekmiyor. Yüzeyde yaşayan, zıplayamayan ve kazamayan akıllı karıncalar düşünebilirsin, bunlar yalnızca bu geometrik ilişkileri, yani açıları ve alanları ölçerek, yaşadıkları yüzeyin düz olup olmadığına karar verebilirler.

- *Yani dünyanın küre olduğunu anlamak için uzaya çıkmak gerekmiyor…*

- Kesinlikle… Yüzeyde ölçeceğimiz mesafeler bize geometriyi söyler.



Şekil 44. Çok yoğun bir "yıldızın" (belki bir kara deliğin) yakınındaki bir cismin olası yörüngelerinden biri. Tüm olası yörüngeler böyle estetik görünmezler...

- *Peki düz ya da eğri olma durumlarının bir matematiksel karşılığı var mı?*

- Var tabii… Geometriyi betimleyen **metrik** dediğimiz bir matematiksel nesne var. Bu, birbirine çok yakın iki noktanın arasındaki mesafenin karesini bu noktaların koordinat değerlerinin farkları cinsinden veren bir ifade. Metrik, bir matris ile temsil

edilebiliyor. (Çünkü koordinat eksenleri dik değilse, mesafenin karesini yalnızca Pisagor teoremi gibi karelerin toplamı cinsinden bulamıyoruz; kaç boyuttaysak o sayıda koordinat farkının, kendisi ve diğer koordinat farklarıyla çarpımlarına ihtiyacımız var.) İfade koordinat değerlerinin farkları cinsinden olduğu için, koordinat sistemi değişirse, metrik de değişiyor. Halbuki uzay aynı uzay.

İşte, bir uzay için eğer metriği temsil eden matrisin birim matris olduğu (yani yalnızca köşegeninde 1'ler olup, diğer elemanlarının sıfır olacağı, dolayısıyla mesafenin karesinin Pisagor teoremi gibi hesaplanacağı) bir koordinat sistemi bulunabiliyorsa, o uzay düzdür ve o koordinat sistemine kartezyen denir.

- *Ama bir uzay için sonsuz sayıda koordinat sistemi kullanılabilir; dolayısıyla bir uzay sonsuz sayıda birbirinden farklı metrik ile betimlenebilir...*

- Bu doğru. Elimizde olabilecek iki metrik ifadesinin aslında aynı uzayı betimleyip betimleyemediklerine nasıl kesin olarak karar verileceği, diferansiyel geometri dediğimiz matematik dalının en önemli sorunlarındandır. Bunun için de, koordinat sistemlerinden bağımsız olan büyüklükler bulmaya çalışırız...

- *Uzay düz ise bile, eğer garip bir koordinat sistemi kullanılıyorsa, düz olduğu belli olmaz. Peki, sonsuz sayıdaki koordinat sistemi arasından kartezyen olanı nasıl bulacağız?*

- Tarif, kartezyen sistemin bulunabileceğine dayalı olmasına rağmen, neyse ki uzayın düz olup olmadığını anlamanın olası tüm koordinat sistemlerini taramaktan daha garantili bir yolu var: "Riemann eğrilik tensörü" dediğimiz bir matematiksel nesneyi hesaplarız, eğer o sıfırsa uzay düzdür, yoksa değildir. Bu tensörün n boyutta
$n^2(n^2-1)/12$ bağımsız bileşeni vardır; yani iki boyutta bir, üç boyutta altı tane, ama boyut sayısı arttıkça karmaşıklaşır. Ayrıca formülü de bu söyleşi için fazla karmaşık, girmeyelim istersen.

37-Eğri uzay-zaman ne demek?

- *Peki zaman boyutunu da ekleyince, uzay-zaman dediğimiz yapı oluşuyor. Bu kavramların ne kadarını oraya taşıyabiliyoruz?*

- Hepsini. Tabii zaman boyutu söz konusu olduğunda, ufak tefek farklılıklar giriyor işin içine. **Uzay-zaman metriği** birbirine çok yakın iki nokta için mesafenin karesini değil; daha önce, özellikle 30. Soru'da bahsettiğimiz uzay-zaman aralığının karesini veriyor. Tabii noktaların koordinat değerlerinin -zaman dahil- farkları cinsinden. Bu bir tanım değişikliği değil, tanım genelleştirilmesi; yani zaman sabit alındığında salt uzay metriğine indirgeniyor. **Düz uzay-zaman** tanımı da çok benzer: Metriği temsil eden matrisin yalnızca köşegeninde -1 ya da +1'ler olup, diğer elemanlarının sıfır olacağı bir koordinat sistemi bulunabiliyorsa, o uzay-zaman düzdür ve o koordinat sistemine kartezyen denir. Ve düz bir uzay-zaman için hesaplanan Riemann eğrilik tensörü sıfır çıkar.

Aynı şekilde bir önceki soruda konuştuğumuz jeodezik kavramı da uzay-zamana aktarılabilir: İki noktayı bağlayan jeodezik, uzay-zaman aralığı komşu eğrilere göre en kısa ya da en uzun olan eğridir.

- *Neden yalnızca en kısa değil?*

- Çünkü uzay-zaman aralığı her zaman mesafe değil; bazen süre de olabiliyor. 30. Soru'da aralıkları uzaysal, zamansal ve ışıksal olarak üçe ayırmıştık; uzaysal aralıklar için jeodezik genellikle en kısa mesafeye karşılık gelen yol; zamansal aralıklar için ise en uzun süreye…[60]

60)Türev bilenler için: Bir fonksiyonun türevi yalnızca çukur noktalarında değil, tepe noktalarında da sıfırdır. Jeodeziklerin sağladığı denklem de bir fonksiyonun türevini sıfırlayan denkleme benzer, yani hem en kısa eğri, hem en uzun eğri çözümleri olabilir.

- *Bunlar biraz matematiksel oldu... Soru 36'daki gibi üçgenler filan cinsinden bir tarif de var mı?*

- Genelde o şekilde düşünülmezse de, örnekler bulunabilir... Bir grafikte eksenlerden biri zaman olunca, açılara anlam vermek biraz zor; ama uzunluklar hâlâ mesafe veya süre olarak anlamlandırılabiliyor. Örneğin, bir eğriyi zamanda öteleyerek bir tür "paralelkenar" inşa edip, bunun karşılıklı kenarlarının eşit olmaları gerekmediğini görmek mümkün; hatta bu tür bir akıl yürütme ile genelçekimin düz uzayda betimlenemeyeceğini bile anlayabiliriz.

- *Nasıl?*

- Şekil 40'a bak. Şekildeki iki diyagonal çizgi, *h* yüksekliğine tırmanan iki ardışık ışık atmasının uzay-zamandaki yollarını gösteriyor. Oluşan paralelkenarın alt kenarı, ışığın alçaktaki periyodu, üst kenarı da *h* yüksekliğindeki periyodudur; çekimsel kırmızıya kayma bunların eşit olmadığı[61] anlamına gelir! Karşılıklı kenarları eşit olmayan bir paralelkenar, düz uzayda mümkün değildir, ancak eğri uzayda var olabilir.

61)Yukarıda zaman daha uzun. Bu olgu, ikizler paradoksunu anlamanın alternatif bir yolunu gösterir bize: Tayyar geri dönerse, ivmelenmiş olması gerekir. Bu da bir süre için sabit bit çekim alanında Tayyar'ın aşağıda, Dünya ve Durmuş'un yukarıda olmaları demektir. Bunun sonucu da Dünya ve Durmuş'un Tayyar'dan daha hızlı yaşlanmalarıdır.

Bu akıl yürütme bize gösteriyor ki, düz uzay-zaman genelçekim ile uyumlu değil. 34. Soru'da genelçekim etkisini uzay-zamanın geometrisine atfedebileceğimizi söylemiştik; şimdi görüyoruz ki, buna mecburuz...

- *Bu atıf, kolay ifade edilebilir bir şekilde mi?*

- Newton'un birinci yasasının uzay-zamandaki ifadesini hatırlıyor musun? 22. Soru'da konuşmuştuk; "Üzerine kuvvet etki etmeyen cisimler (uzay-zamanda) bir doğru boyunca hareket ederler" idi. Ama 36. Soru'da da "doğru"nun düz uzaylara özgü bir özel hal olduğunu, daha genel kavramın jeodezik olduğunu gördük.

Bunlar ışığında varılan yasa ise şu: **Üzerine kuvvet etki etmeyen cisimler (genel bir uzay-zamanda) bir jeodezik boyunca hareket ederler.** Bu arada, zamansal yörüngeler için (ki 30. Soru'da tüm kütleli cisimlerin bu tür yörüngeleri izleyeceğini konuştuk) jeodezik, uzay-zamandaki iki nokta arasında, en büyük özzamanı veren yörüngedir...

- *Peki, cisimlerin hareketlerini geometri belirliyor... Geometriyi ne belirliyor? "Evrenimiz böyle" mi, yoksa geometri değişebilir mi?*

- 33. Soru'nun sonunda konuştuğumuz gibi geometriyi, maddenin 10 farklı özelliğinin (enerji ve momentum yoğunlukları, basınç...) uzay-zamandaki dağılımları, Einstein denklemleri aracılığıyla belirler. Wheeler'in anlatımıyla: Madde, uzay-zamana nasıl eğrileceğini söyler, eğrilik maddeye nasıl hareket edeceğini...

38-“Genelçekim” ışığı saptırır mı?

- *Bu arada, bizim ivmelenen asansörle ilgili bir şey takıldı aklıma. Biz hep ışığın - ya da fotonun- düşey gidişini düşündük. Yatay giderse ne olacak?*

- Işık yatay başlarsa, ivmelenen asansörde tam karşı noktaya değil, onun biraz altına varır (Şekil 41), çünkü ışık karşıya geçene kadar, karşı duvar biraz hızlandığı için, yukarı doğru ışıktan daha fazla gitmiştir. Eşdeğerlik ilkesi bize bu durumun genelçekim alanına eşdeğer olduğunu söylediğine göre, bir genelçekim alanında da ışık sapacaktır. Ancak, bu sapma bir laboratuvar deneyinde ölçmek için fazla küçüktür.[62] Dolayısıyla, ölçülebilecek büyüklükte bir sapma için, kuvvetli bir çekim ve/veya ışığın bu alanda uzun mesafe kat etmesi gerekir. Bu şartlar yakın çevrede ancak Güneş'in yüzünü sıyıran bir ışın için yerine gelir.

62)Hesap şöyle: Işığın asansörü yatayda geçme süresi: $t \approx w/c$. Bu süre içinde asansörün ivmeden dolayı gittiği ekstra mesafe: $x = (1/2)gt^2 \approx gw^2/(2c^2)$, dolayısıyla sapma açısı $\theta \approx x/w \approx gw/(2c^2)$ olarak bulunur. (radyan cinsinden) 10 m genişliğinde bir oda için, x atom çekirdeği boyutlarında çıkar...

- *Güneş yüzeyini sıyıran bir ışın, ancak arka plandaki bir yıldızdan gelebilir. Ama Güneş'i görebiliyorken - yani gündüz- yıldızları göremeyiz ki...*

- Haklısın; nadir görülen bir durum hariç: Tam Güneş tutulması sırasında yıldızları görebilirsin... Bu yüzden, bu hesap, ancak böyle bir tutulma sırasında sınanabilir.

Bu durum için hesabımızı yaparsak, yaklaşık 0,9 açı saniyelik (bir derece, 60 açı dakikasına, o da 60 açı saniyesine bölünür) bir sapma bekleriz. Çok küçük bir sapma, ama ölçülemeyecek kadar küçük değil. Ancak, tam Güneş tutulmaları genellikle dünyanın ücra köşelerinde birkaç dakikalığına gözlemlenebildiğinden, gözlem biraz gecikti. 1914'te bir tutulmayı gözlemek için Rusya'ya giden bir ekip, 1. Dünya Savaşı'nın çıkmasıyla esir alındı ve gözlem yapamadı. Bir sonraki gözlem için 1919'da Eddington'ın iki ekibi yola çıktığında, Einstein sapma hesabını genel görelilik ile tekrarlayıp, ilk hesabın iki mislini, yani 1,75 açı saniyesini bulalı dört yıl olmuştu.



Şekil 46. Bir pantograf. Düzenek uzatılırken, herhangi bir nokta, diğerlerinin uzaklaşma hızını mesafeye orantılı görür; aynen Hubble kanunu gibi.

- *İlkinde hesap hatası mı vardı?*
- Hayır ama, o hesapta ne jeodezik var, ne uzay-zaman geometrisi... Aslında sorun, fotona "genelçekimsel kütle eşdeğeri" atamaya çalışmaktan ve daha önce dediğimiz gibi (28. Soru), bir cismin çekimsel özelliklerinin aslında tek rakamla ifade edilemeyecek olmasından kaynaklanıyor. Burada, hareket yönü ile "çekim alanı" yönünün aynı olup olmaması fark ediyor; tesadüfen, yönler aynı olunca cevap doğru çıkıyor, ama dik olunca yanlış. Bu yüzden çekimsel kırmızıya kaymada, üçüncü, foton-parçacık dönüştürücü makineli düşünce deneyi önemli ve gerçek genel göreliliği kullanmadığımız halde, sonucu doğru bulduğumuzdan emin olmamızı sağlıyor.
- *Peki, ölçüm ne verdi? 0,9 mu, 1,75 mi?*

- 1,75 tabii. Ve 32. Soru'da konuştuğumuz gibi, bu ölçüm, o zamanın ünlü bilimcilerinin övgüleri ve bunların dünya basınında yayımlanması, Einstein'ı dünya çapında şöhrete ulaştırdı. Bu övgüler, genel göreliliğin matematiksel olarak çok estetik bir kuram olmasından başka, bu ışık sapmasının daha önceki kuramlarca öngörülmeyen ve gözlemsel olarak keşfedilmemiş bir olgu olmasından (ve 1914 gözlem ekibinin makûs talihinden!) kaynaklandı.

- *Güneş'ten başka ışığı ölçülebilir derecede saptıran nesne yok mu?*

- Çok nadir de olsa böyle nesnelere rastlanıyor; buna **çekimsel mercek etkisi**, bu nesnelere de **çekimsel mercek** deniyor. Örneğin, çok uzaktaki parlak bir cismin ışığı, aramızdaki büyük bir gökada ya da gökada kümesi tarafından saptırılabiliyor ve böylece çarpık ya da çoklu görüntüler oluşabiliyor; buna **güçlü mercekleme** (Şekil 42'ye bak) deniyor. İkinci bir olasılık olarak, gökadamızın halesindeki (yıldızları gördüğümüz düzlem haricinde, merkezden uzak bölge) yoğun, küçük cisimler (beyaz cüce, nötron yıldızı, kara delik gibi) bir yıldızın önünden geçerken, onun ışığını çok kısa bir süre için bize odaklayıp, yıldızın görünen parlaklığının artmasına neden olabilirler; buna **mikromercekleme** denir. Bunların nadir olduğunu söylemiştim; iyi ki de böyle—

- *Neden iyi ki böyle?*

- Eğer sık rastlansaydı, yani tüm ışıklar öteye-beriye sapsaydı, astronomik gözlemler imkânsızlaşırdı; çünkü optik, ışığın boşlukta doğru çizgi (ya da evreni oluşturan eğri uzay-zamanda olabildiği kadar doğru çizgi), üzerinde ilerlemesi üzerine kurulmuştur. Aslında, kozmoloji konuşurken bahsedeceğiz; büyük ölçeklerde evrenin eğriliği çok "düzgün"dür; bu sayede uzak gökadaların görüntüleri çarpık olmuyor ve bu mesafelerde anlamlı gözlem yapılabiliyor.

39-Gezegen yörüngelerinde genel görelilik ne fark yaratır?

- *Işığın sapması, genel görelilik ile gündeme gelen, öncesinde kimsenin düşünmediği bir etki demek... Peki, önceden Newton genelçekim kuramı çerçevesinde incelenmiş olgularda yeni kuram bir değişikliğe sebep oldu mu? Örneğin, gezegen yörüngelerinde...*

- Güneş etrafında dolaşan bir gezegenin yörüngesinin görelilik öncesi fiziğe göre elips olduğunu hatırla. Hani Kepler fark etmiş, Newton da genelçekim yasasının öyle gerektirdiğini bulmuştu... Ancak bu gerektirme, noktasal Güneş ve bir noktasal gezegen varsayımlarıyla tam olarak geçerlidir; bu varsayımlardan sapma olduğu ölçüde elipsten de sapma beklenir.

- *Pek de fazla bir sapma yok herhalde ki, liselerde, hatta üniversitelerdeki giriş seviyesindeki derslerde Kepler yasaları okutuluyor...*

- Eh, bu doğru tabii. Ama önce bir konuşalım, bu sapma, ne şekilde ifade edilebilir? Gösterilebiliyor ki, kuvvet yalnızca iki cisim arasındaki mesafeye bağlı ise, gezegen Güneş'ten en uzak mesafeden başlayıp, Güneş'in etrafında bir tur atıp, tekrar Güneş'ten en uzak mesafeye ulaştığında, tam olarak aynı noktaya dönmüş olmuyor; Şekil 43'te görebileceğin gibi, bu örnekte, yörüngedeki dönüş yönünde biraz ileride bir noktaya varıyor; yani açısal olarak hareketi 360°'yi biraz geçiyor.

Sabit eliptik yörüngeden bu küçük sapmayı, elipsin yavaşça dönmesi şeklinde düşünüp, sapma miktarını da elipsin tur başına dönüş açısı olarak ifade edebiliriz. Ama sapma o kadar küçük ki, yüzyıl başına açı olarak ifade ediliyor. Örneğin, Merkür için elipsin dönüşü, bir yüzyılda 5600 açı saniyesi, yani iki dereceden biraz az.

- *Bu sapmaya yol açabilecek üç etki saydınız, bunların hepsi de sapmaya aynı derecede mi katkı yapıyor?*

- Hayır. Aslına bakarsan, Güneş'in ve gezegenlerin noktasal olmamalarının önemi yok, çünkü bir kürenin - daha doğrusu küresel simetriye sahip bir cismin- çekimsel etkisi, aynı kütleli bir noktaya eşdeğer; tabii ki kürenin dışı için. Sapmayı yaratan asıl etki, Güneş Sistemi'nde **tek bir** gezegen olmaması. Yani gezegenler ana olarak Güneş'in etkisi altındalar, ama uzaktan uzağa, belli belirsiz birbirlerini de etkiliyorlar. Bundan en çok etkilenen Merkür oluyor, çünkü saptırıcı etki Güneş'e yaklaştıkça artıyor.

İşin ilginci ve etkileyici olanı, 19. yüzyıl ortalarına gelindiğinde, Merkür için bu olayın hem duyarlı gözlemleri, hem de bilinen etkilerin hesapları yapılmış ve arada bir yüzyılda 43 açı saniyelik bir fark bulunmuş. Yüzyılda 43 açı saniyesi, yani bir derecenin altmışta birinden az bir miktar açıklanamayan dönme! Bu, önemlice bir problem olarak fizikçilerin ve gökbilimcilerin önünde duruyordu.

Tabii, iki olası çıkış yolu var. Ya gözlemlerinizde bir eksik var, ya kuramınızda. Bu problemi en etraflıca ortaya koyan Le Verrier'in önerdiği çözüm, hesaba katmadığımız bir gezegenin varlığı olmuş, adını da Vulcan koymuş. Bu da gayet anlaşılabilir bir yaklaşım, çünkü aynı Le Verrier, bir süre önce Uranüs'ün yörüngesindeki sapmaları analiz ederek bir gezegenin daha var olması gerektiği sonucuna varmış ve onun söylediği koordinatlara bakan gözlemciler gezegeni adeta elleriyle koymuş gibi bulmuşlardı; bu gezegene sonradan Neptün adı verilmiştir. Bu yüzden Le Verrier "kalemiyle gezegen keşfeden adam" diye anılır.

Ancak, Merkür'den daha iç bir yörüngede olduğu düşünülen Vulcan, hiçbir zaman bulunamadı. Bu kalan 43 açı saniyesinin (bir yüzyılda!) açıklanması, sonunda genel görelilik sayesinde oldu. Einstein'ın bu etkiyi hesaplayıp da tam da açıklanamayan miktarı bulması, genel göreliliğin ilk başarılarından biridir.

- *O kadar küçük bir etki ki bu, genel görelilik, gezegen yörüngelerini neredeyse hiç etkilemiyor diyebiliriz galiba...*

- Ama bu, bizim Güneş Sistemi'nde böyle; çünkü Güneş'in çekim alanı çok kuvvetli değil, daha doğrusu, Güneş uzay-zamanı çok az eğiyor. Uzay-zamanı daha fazla eğebilmek için bir yıldız ya daha kütleli ya da aynı kütleyle daha küçük olmalı. Aslında Güneş'i (kütlesini değiştirmeden) küçültsek de Merkür veya Dünya civarındaki eğrilik değişmez, ancak şu anda Güneş'in içinde kalan hacmin eğriliği artar, bu bölgenin bir kısmı da yıldızın dışında olacaktır. İşte böyle, yeterince eğri bir bölgede dolaşan bir cismin yörüngesinin elips ile bir ilgisi kalmaz, bir çiçek şekline dönüşür. (Örnek, Şekil 44.)

40-Genel göreliliğin uygulama alanları nelerdir?

- *Ama yine de, demek ki bizim Güneş Sistemi'nde genel göreliliğin pek bir etkisi yok; zaten böyle olduğunu 4. Soru'nun başında da konuşmuştuk. Yıldız ışığı sapması ve gezegen günberilerinin hareketleri, pratiğe neredeyse hiç etkisi olmayan, bize kendini göstermeyen, aksine ölçebilmek için büyük çaba göstermemiz gereken olgular. Peki, genel göreliliğin yalnızca ilke olarak değil, gerçekten, yani ölçülebilir büyüklüklerde hatırı sayılır fark yarattığı durumlar nelerdir? Zaten birini az önce konuştuk, yoğun cisimlere yakın hareket. Başka ne var?*

- Evet, bizim yakınlarımızda etkiler küçük. Etkisi küçük ya da önemsiz derken, "geçersiz" demeyi kastetmediğimizi hatırlayalım; yalnızca yapılabilecek deney veya gözlemler için genel görelilik çerçevesinde yapılacak hesapların sayısal sonuçlarının, Newton fiziği çerçevesinde yapılacak hesapların sayısal sonuçlarına çok yakın olmasını kastediyoruz. Ama genel göreliliğin etkilerinin yakınlarımızda küçük olması, illa günlük hayatımız için hiçbir önemi yok demek değil; çok hassaslık gerektiren uygulamalarda, küçük etkiler sonucu değiştirebilir. Bunu daha sonra konuşuruz; önce genel göreliliğin senin deyiminle, önemli fark yarattığı bağlamları bir sıralayalım...

Birinci bağlam, yalnızca yoğun cisimlere yakın hareket değil, yoğun cisimlere yakın uzay-zamanın yapısı aynı zamanda. Genel göreliliğin önemli olması için ihtiyacımız olan yoğunluk, atom çekirdeklerinin yoğunlukları mertebesinde, yani en yoğun metalin (Osmium, 22,6 g/cm^3) 10 katrilyon katı.

- *Böyle bir yoğunluğu nerede bulabiliriz ki? Aslında zor olduğunu tahmin ediyorum, neden zor? Yani maddeyi neden sıkıştıramıyoruz o kadar?*

- Neden çok sıkıştıramadığımız sorusunun ayrıntılı cevabını biraz sonraya bırakalım; şimdilik, madde sıkıştıkça, sıkışmaya artan bir basınçla direnç gösteriyor ve bu artışı o yoğunluklara kadar yenebilecek bir kompresörümüz yok demekle yetinelim. Doğada ise bu yoğunluğu ancak nötron yıldızları dediğimiz cisimlerde bulabiliyoruz. Ancak, genel göreliliğin çapıcı öngörüsü şu: Maddenin

sıkışması -şu veya bu şekilde- belli şartları sağladığı zaman, aralarındaki çekime artık hiçbir basınç direnemiyor ve madde bir anlamda bir nokta olana kadar çöküyor. Bu da uzay-zaman geometrisinde çok önemli değişikliklere yol açıyor; buna **kara delik** diyoruz.

- *Hani genelçekim diye bir kuvvet yoktu?*

- Benim "çekim" demem lafın gelişi, çoğu zaman Newton fiziği kullanmaktan kalan bir alışkanlık. Aslında kastettiğim, "yeterince yoğun bir cisim, bulunduğu civarda uzay-zamanı o derece eğebilir ki, onu oluşturan parçalar, üzerlerine etki edebilecek tüm kuvvetlere rağmen, uzay-zamanda birbirlerine yaklaşan yollar izlerler" demek.

- *Herhalde "yoğun cisim" bağlamında bundan ötesi yoktur; yani elimizde nötron yıldızları ve kara delikler var. Peki başka nerede genel görelilik önemli? Yıldızların ya da gökadaların yapısı mesela?*

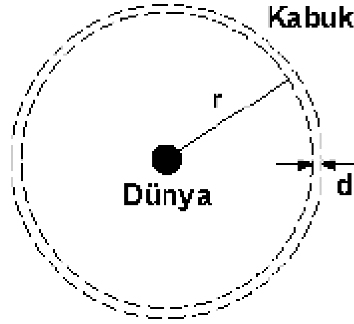
- Hayır, normal (yani hidrojen → helyum nükleer tepkimesiyle ışıyan, bir diğer deyişle "ana kol") yıldızların, kızıl dev ya da beyaz cüce denen yıldızların; hatta gökadaların yapısında genel görelilik önemli bir rol oynamıyor. (Gökadaların çoğunun merkezinde bulunduğunu düşündüğümüz dev kara delikler hariç -bunu da sonra konuşacağız.) Genel göreliliğin önemli fark yarattığı ikinci bağlam ise, evrenin bir bütün olarak kendisi.

Newton fiziğinde kozmoloji (evrenbilim) biraz belirsiz; evren sonlu mudur, sonsuz mu; durağan mıdır, değil mi; homojen mi, değil mi? Ancak 18'inci yüzyılda, Olbers paradoksu denen bir akıl yürütme ile, **evrenin hem durağan, hem sonsuz, hem homojen olamayacağı** anlaşıldı.

- *Nasıl?*

- Bir an için böyle olabildiğini varsayalım. Evren homojen ise, her yerde yerel özellikleri yaklaşık olarak aynıdır, dolayısıyla yıldızların ortalama ışıma güçlerinin de evrenin içindeki konumlarına göre değişmeyeceğini kabul etmek gerekir. Şimdi, dünyadan r uzaklığındaki tipik bir yıldızın dünyada gözlenecek parlaklığı, yani ışık şiddeti $P/(4\pi r^2)$ ile verilir; çünkü yıldızın ışıma gücü P, $4\pi r^2$'lik bir yüzeye dağılıyor. Evreni dünya merkezli, iç yarıçapı r, kalınlığı d olan küresel kabuk hacimlerine ayırırsak (Şekil 45'e bak), bir küresel

kabuktaki yıldız sayısı (birim hacimdeki yıldız sayısı n olmak üzere) yaklaşık $n4\pi r^2 d$ olur. Bunların dünyaya yolladığı toplam ışık şiddeti, bu iki rakamın çarpımı, yani ndP olur, yani bütün kabuklar için aynı. Ama bu kabuklardan sonsuz tane var! Dolayısıyla dünyaya gelen toplam ışık şiddeti sonsuz olmalı!



Şekil 45. Olbers paradoksu: Gece gökyüzünün karanlık olması, evrenin hem sonsuz, hem homojen hem de durağan olamayacağını gösteriyor...

- *Yıldızlar birbirlerinin ışığını bir ölçüde engellemeyecek mi?*

- Evet, engellerler. Bu etki hesaba katılınca, şiddet artık sonsuz olmaz, ama yine de gökyüzünün her noktasının Güneş'in yüzeyi kadar -yani bakamayacağımız kadar- parlak olması gerektiği anlaşılır. Yani tekrar ediyorum, **gecenin karanlığı, bize evrenin hem durağan, hem sonsuz, hem homojen olamayacağını** söyler. Bu üç özellikten en az biri gitmeli; halbuki Avrupalı aydınlar bu üç özelliği de çok seviyorlardı...

- *Hangisi gidiyor?*

- Homojenlik kalıyor, sonsuzluğu henüz bilmiyoruz. Ama durağanlık kesin gidiyor, çünkü evren genleşiyor.

6. Bölüm: - KOZMOLOJİ

41-Evrenin genleşmesi ne demek? Nereye doğru genleşiyor? Her şey mi genleşiyor? Ben de genleşiyor muyum?

- *Evrenin genleşmesi ne demek?*

- Bunu 1929'da Edwin Hubble keşfetti. Hubble, önce "sarmal bulutsu"ların -en azından bazılarının- uzaklıklarını ölçmenin yolunu buldu; bunların bizim Samanyolu gökadamızın büyüklüğüne göre çok uzakta olduklarını, dolayısıyla onların da Samanyolu gibi birer gökada olduklarını gösterdi. Sonra daha fazla gökadanın uzaklıklarını ölçünce, bunların uzaklıkları arttıkça bizden artan bir hızla uzaklaştıklarını buldu ve bunu Hubble yasası dediğimiz şekilde ifade etti: $v = Hd$. Bu H'ye Hubble sabiti denirdi, şimdi Hubble parametresi deniyor.

- *Neden?*

- Sabit denince genellikle değişmez gibi anlaşılıyor. Halbuki kastedilen, d'den yani mesafeden bağımsız olması; H zamanla değişebiliyor.

- *Böyle bir şey bulmak için her gökadanın hızını ve mesafesini ölçmek gerek. Nasıl yapılıyor bu?*

Hız nispeten kolay. 25. Soru'nun sonunda konuştuğumuz gibi, çeşitli atomların yaydığı ya da soğurduğu ışınım frekanslarının Doppler kaymaları kullanılarak belirlenebiliyor. Mesafeler nasıl ölçülüyor sorusuna ise, "büyük güçlüklerle" diyerek cevap verebilirim. Çünkü, hiçbir mesafe ölçme yöntemi tüm ölçeklerde işe yaramıyor; 8-10 farklı yöntem, her biri kendininkinden küçük ölçekteki yöntemin

üzerine bina ediliyor. Örneğin Hubble'ın kullandığı yöntem, Sefeid denilen bir grup yıldızın gözlemine dayanıyor. Bunlar nadir rastlanan (Samanyolu'ndaki yaklaşık 100 milyar yıldızın arasında bunlardan 1000 kadar var) bir yıldız türü; özelliği, parlaklığının periyodik olarak değişmesi ve bu **değişim periyodunun ışıma gücünün bir fonksiyonu** olması. Periyot kolayca ölçülebildiği için, bu ilişki bilinince ışıma gücü de bulunmuş olur. Işıma gücü bilinen cisimlere astronomide **standart mum**[63] denir ve mesafe ölçümünde kullanılabilirler—

63)İngilizce: Standard candle.

- *Çünkü ışıma gücü aynı olan iki cisim farklı parlaklıklarda gözüküyorsa, zayıf gözükeni daha uzaktır. Işıma güçleri aynı değilse bile, ne olduklarını biliyorsam, görünen parlaklıktan mesafeyi kolayca hesaplarım...*

- Ancak, iş ışıma gücünü bulabilmekte, yani bahsettiğimiz ilişkiyi bilmekte. Bu ilişki 1912'de Henrietta Leavitt adındaki bir hanım tarafından, Macellan Bulutları denen, bizim gökadamızın hemen dışındaki bir çift cüce gökadadaki Sefeid'leri incelenirken fark edildi. Tabii ki bunun size verdiği yalnızca orantılar. Periyodu daha uzun olanın daha parlak olduğunu görüyoruz ve hepsi aynı cüce gökadanın içinde olduklarından, bizden uzaklıkları yaklaşık olarak aynı, **dolayısıyla parlaklıkları ışıma güçlerinin bir ölçüsü**. Ancak ışıma güçlerini mutlak değer olarak bulmak için, Macellan Bulutları'na olan uzaklığı başka bir yöntemle bulmak zorundayız; Sefeid'leri burada standart mum olarak kullanamayız.

Bu yapıldıktan sonra ise, diğer gökadalardaki Sefeid'leri -ki şansımıza Sefeid'ler nispeten yakın gökadalarda (milyonlarca ışık yılı uzaklıktan) görebileceğimiz kadar parlaklar- standart mum olarak kullanarak o gökadaların uzaklıkları belirlenebilir; Hubble'ın yaptığı da buydu.[64] Ancak, yakın Sefeid'lerin uzaklıklarını belirlemek için kullandığımız yöntemde bir hata varsa, o zaman bulduğumuz Sefeid ışıma gücü-periyot ilişkisi de hatalı olur, dolayısıyla Sefeid'leri kullanarak ölçtüğümüz daha büyük uzaklıklara da hata karışır. İşte bütün o farklı uzaklık ölçme yöntemleri, birbirlerini bu şekilde etkiliyorlar, bu yüzden "büyük güçlüklerle" dedim biraz önce uzaklık ölçümü için.

64)Hubble'ın çalışma arkadaşlarından birisi ilginçtir: Milton Humason, 14 yaşından sonra okumamış, gözlemevine malzeme taşıyan kervanda çalışan bir katırcıymış. (Gözlemevi bir dağın zirvesinde olduğundan katırla ulaşılıyormuş.) Sonra orada hizmetli olmak istemiş ve kabul edilmiş. Merakından, yavaş yavaş astronomların ufak tefek laboratuvar işlerini yapmaya başlamış, zamanla işi ilerletmiş. Meraklı ve yetenekli olduğunu gören müdür; bırakın doktorayı, lise diploması bile olmadığı halde, Humason'a bilimsel kadro vermiş. Humason, Hubble ile birlikte çalışmış ve Hubble yasası için gerekli gözlemlere önemli katkısı olmuş. Ölümünden sonra ayda bir kratere ismini vermişler…

- *Hubble yasası, gökadaların daha hızlı olanlarının bizden daha uzakta olduğunu gösteriyor. Bunu kafamızda zamanda geri çevirirsek, hepsi aynı zamanda bizim olduğumuz noktada toplanır. Yani tüm gökadalar bizim olduğumuz noktadan mı dağılmış?*

- Hayır, biz evrenin merkezinde değiliz. Tüm gökadalardaki astronomlar Hubble yasasını bulurlardı... Bunu anlamak için, Şekil 46'da gördüğün pantografa[65] bak. İlk eklemi sabitle, son eklemi saniyede 7 cm hızla çek. Diğer eklemlerin hızları, ilk eklemden uzaklıkları sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5, 6 cm/s olur değil mi? Yani Hubble yasasını sağlarlar. Şimdi olaya üçüncü eklemin açısından bak. Birinci eklemin hızı (tabii ki cm/s olarak) -2'dir, ikinci eklemin -1, tabii ki üçüncünün 0; dördüncünün 1, beşincinin 2, altıncının 3, yedincinin 4. Yani ona göre de hızlar mesafeye orantılı olarak artıyor, hem de orantı sabiti de aynı. Yani o da kendini merkez olarak kabul edebilir...

65)Bu tip düzenekler, eskiden, fotokopi makineleri ve tarayıcı-bilgisayar-yazıcı üçlüsü yokken, bir şekli büyütmek ya da küçültmek için kullanılırdı: Düzeneğin bir ucu sabitlenir, yazmayan bir tür kalem düzeneğin sabit uca yakın bir eklemine, yazan kalem sabit uca uzak bir eklemine yerleştirilir, yazmayan kalem ile şeklin çizgileri üzerinden geçilince, yazan kalem şeklin daha büyük bir kopyasını çıkarırdı. (Tabii ki kalemleri değiştirerek küçültme yapılabilirdi.) Ayrıca fotoğrafçılıkta kullanılırdı, bir de muzip çizgi film karakterleri uzaktaki nesneleri yakalamak için kullanırlar.

Sonuç olarak Hubble yasası tüm gökadaların adeta bir patlamada dağılan şarapnel parçaları gibi birbirinden uzaklaştıkları anlamına geliyor. Ancak—

- *Big Bang, yani Büyük Patlama dedikleri bu mu?*

- Bir bakıma evet. Ama biz, "Büyük Patlama modeli" derken, yalnızca genleşmeyi kastetmeyiz. Ayrıca evrenin geçmişte—

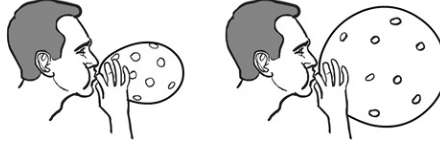
- *Bir dakika, aklıma bir şey geldi... Konuyu biraz dağıtıyorum galiba ama, "kozmik ardalan ışınımı" diye bir şey duydum, Büyük Patlama'dan kalmış. Ama en hızlı şey ışık olduğuna göre, Büyük Patlama'da ortaya çıkan ışığın -ya da fotonlar diyelim- patlama noktasından ışık hızıyla uzaklaşıp, diğer*

her şeyi arkasında bırakması gerekmez miydi? Nasıl görüyoruz bu ardalan ışınımını?

- Büyük Patlama, önceden varolan boş bir uzayda, bir noktaya sıkıştırılmış maddenin bir patlamayla etrafa saçılması değildir de ondan. Uzayın kendisinin çok çok küçük boyutlardan genleşmesidir. Dolayısıyla, Büyük Patlama tek bir yerde değil, evrenin her yerinde meydana gelmiştir.

- *Nasıl yani?*

- Yine bir benzetme ile anlatayım: Evreni, şişen bir balon ile temsil edelim (Şekil 47):



Şekil 47. Genleşen evren için bir model. Çizim: Barış Mengütay.

Gökadalar arasındaki mesafelerin birbiriyle orantılı arttıkları benzetmeden görülebiliyor. Büyük Patlama'yı benzetmek için ise, geçmişe gidilince bunun sıradan bir balon gibi davranmayıp, şekilde gösterilen davranışı devam ettirdiğini düşünmek gerek. Bu durumda Büyük Patlama, tüm gökadalar arasındaki mesafelerin aynı anda sıfıra gitmesi, yani balonun yarıçapının sıfır olmasıdır. Peki, bu benzetmede Büyük Patlama balonun neresinde oluyor?

- *Merkezindee...*

- Tam doğru soramadım... Burada evreni temsil eden, balonun yüzeyi. Bu yüzden, gökadalar balonun yüzeyinde gösteriliyor, içinde yoklar; yani içinin de dışının da anlamı yok. (Soru 36'nın akıllı karıncalarını düşün.) Soruyu daha doğru şekilde tekrarlıyorum: Bu benzetmede Büyük Patlama balonun yüzeyinin neresinde oluyor?

- *Galiba her yerinde...*

İşte bu yüzden kozmik ardalan ışınımı görebiliyoruz, çünkü ışık, yüzeyde dolaşıyor.

Balonun üzerine bir koordinat sistemi çizdiğini düşün, dünya yüzeyindeki paralel ve meridyen çizgileri gibi. Yukarıdaki soruyu sormanın bir başka şekli de şudur: Bu benzetmede Büyük Patlama hangi koordinatlarda oluyor? Tabii ki cevabı, herhangi bir koordinat noktasında değil, tüm koordinatlarda. Öte yandan, biz zaman geçtikçe, daha uzak koordinatlardan gelen ardalan ışınımını görüyoruz.

- *Peki balonun yüzeyine dik, yani yarıçap yönündeki koordinatın hiç mi bir anlamı yok? Yani evren "nereye doğru" genleşiyor?*

- Bu soruyu sormak zorunda değilsin; o koordinata anlam vermeden de her şeyi yapabilirsin. Ama illa istiyorsan, ya da seni rahatlatacaksa, gözlemleyemediğimiz bir ek boyut olarak düşünebilirsin; zaten daha önce konuştuğumuz gibi (Soru 22) çok boyutlu kuramlar da var.

- *Bu boyutu zaman olarak düşünebilir miyiz?*

- Bu biraz riskli; ancak evrenin genleşmesinin durmayacağı modellerde yapabilirsin—

- *Yani bazı modellerde genleşme duruyor, bazılarında durmuyor, öyle mi?*

- Evet, genleşme hızı ve evrenin içeriği, geleceği belirliyor; aslında Newton fiziği kullansan da bu böyle, ama matematiksel ilişkiler biraz değişiyor. Her neyse, yarıçap yönündeki koordinatı zaman olarak düşündüğün durumda, evrenin genleşmesi durup geri dönünce, zamanın da geriye işlediğini varsaymak zorunda kalırsın.

- *Bir soru daha... Balon kapalı, sonlu bir yüzey. Bu benzetme de evren için doğru mu?*

- Balon ya da küre yüzeyi iki boyutlu. Üç boyutlu kapalı uzaylar da mümkün; yani öyle jeodezikler bulabilirsin ki, küre yüzeyindeki meridyenler gibi, kendi üzerine geri döner. Yani hep aynı yönde giderek başlangıç noktana dönebilirsin.[66] Ancak evren kapalı olmak zorunda değil; açık, yani sonsuz da olabilir.

66)Bunu kapalı evrenin nasıl bir şey olduğunu anlatmak için söylüyoruz ve böyle bir evren genleşmiyor ise geçerli; ya da evreni bir anda dondurduğunuzu düşünün. Eğer evren genleşiyorsa, işler değişiyor, örneğin tekrar çöken bir modelde evrenin etrafında bu şekilde bir tur atmak için gereken süre, Büyük Patlama ile evrenin genleşmesinin durup, tekrar çökmesine kadar geçen süreden uzun.

- *Tabii ki eğer evren, balonun iki boyutta eğri olduğu gibi eğri olabiliyorsa, genel görelilik önemli olmalı. Ama ona geçmeden genleşme hakkında bir sorum daha var: Genleşme, her şeyin genleşmesi mi demek? Gökadalar arası mesafeler genleşiyor, gökadalar da genleşiyor mu? Yıldızlar, gezegenler vs., tüm cisimler mi genleşiyor? Örneğin, ben de genleşiyor muyum?*

- Nedir mesafe? Nasıl ölçersin? Elinde bir birim çubuk vardır, ölçeceğin mesafeye bu çubuğu art arda yatırırsın, dört defada mesafeyi bitirirsen, mesafenin uzunluğu dört birimdir. Hem mesafeyi, hem birim çubuğu üç ile çarpsan, mesafenin uzunluğu yine dört birim olur. Yani **her şeyin aynı oranda genleşmesinin anlamı yoktur.**

Dolayısıyla evrende her şey genleşmez. Peki ne genleşir? Dinamiği evrenin tamamı tarafından etkilenen uzunluklar, yani birbirine uzak gökadalar arasındaki mesafeler. Dinamiği yerel etkileşimlerle belirlenen uzunluklar ise genleşmez. Gökadalar genleşmez, hatta komşu gökadalar arasındaki mesafeler bile genleşmeyebilir. Yıldızlar, gezegenler, sen-ben de genleşmeyiz. Atomlar genleşmez, çünkü onların büyüklüğünün genelçekim ile ilgisi yoktur. Ne belirler atomların büyüklüğünü?

- *Kuantum fiziği[67] ve elektromanyetik etkileşim.*

67)Bilenler için: Schrödinger denklemi.

- Aslında senin-benim büyüklüklerimiz de atomlar gibi kuantum ve elektromanyetizma etkileşimiyle belirlenir. Gezegenler ve yıldızların büyüklükleri bunlar ve yerel genelçekim ile, gökadaların büyüklükleri yerel genelçekim ile belirlenir. Şekil 47'deki gökada çizimlerinin balonla birlikte genleşmediklerini belki de fark etmişsindir; yani bu modelde koordinat sistemini balonun üzerine çizebilirsin, ama gökadaları çizmemeli, onları balona yapıştırılmış küçük düğmeler gibi düşünmelisin...

42-Evren konusunda genel göreliliğin getirdikleri nelerdir?

- *Genel görelilik evren için ne kadar önemli? Diğer kuvvetlerin önemi ne?*

- Güçlü ve zayıf nükleer kuvvetlerin -ki onlar 1915-17’de bilinmiyordu- menzili atom çekirdeklerinin dışına çıkamıyor; dolayısıyla bırak astronomi veya kozmolojiyi, günlük mekaniği bile etkilemeleri mümkün değil. Elektromanyetik kuvvet ise, birbirini çeken iki tür yüke sahip ve **fazla güçlü**—

- Güçlü olması niye onu önemsiz yapsın? Tam tersi olması gerekmez mi?

- O kadar güçlü ki, astronomik bir cismin net yükü olamıyor. Diyelim ki bir cisim pozitif yüklendi, hemen yakındaki negatif yükleri çeker ve bu şekilde net yükünü sıfırlar. Nötr olunca da elektromanyetik kuvvet yaratmaz ve ondan etkilenmez.

- *Ya yakında negatif yük yoksa?*

- Elektrik yük korunduğuna ve evrenin net yükü sıfır olduğuna göre, bir yerde pozitif yük varsa, başka bir yerde de negatif yük vardır; hatta yakında olmasını bekleriz, çünkü büyük ihtimalle bu pozitif yük, o negatif yükün uzaklaşması şeklinde ortaya çıkmıştır. Ayrıca ortada dolaşan yüklü parçacıklardan oluşan kozmik ışınlar da yük taşıyarak yüklü cisimleri uzun vadede nötr hale getirebilir.

- *Ve meydan en zayıf etkileşim olan genelçekime kalır, öyle mi?*

- Evren için öyle...

- *Einstein, genel göreliliği evrene uygulayınca, evrenin genleşmesini öngördü tabii.*

- İşin ilginci, genel görelilik genleşmeyi öngörür, ama Einstein öngörmedi.

- *Nasıl yani?*

- Einstein, evrenin durağan olması gerektiği konusunda derin bir fikre sahipti; o kadar ki, durağan çözüm bulabilmek için kuramı bile değiştirdi.

- *Neden böyle bir fikre sahipti ki?*

- O zamanki Avrupalı aydınlar, evrenin homojenlik, sonsuzluk ve durağanlık özelliklerinden tutarlı olabildiği kadar fazlasına (üçü birden olamaz, soru 40’tan Olbers paradoksunu hatırla) sahip olması gerektiğini düşünüyorlardı. Einstein da bu havadan etkilendi.

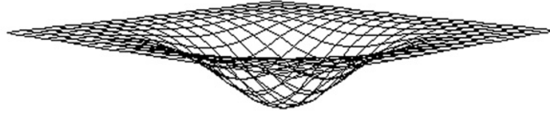
- *Neden Avrupalı aydınlar bu özellikleri seviyorlardı?*

- Bir kere bu konularda, yani kozmolojik ölçekte hiç gözlem yoktu, bizim gökadamız olan Samanyolu’nun bile boyutları ancak 1917’de

belirlenebildi; gerçi bir gökada içinde bulunduğumuz 19. yüzyıl içinde anlaşılmıştı. Ancak dışarıda ne var, bilinmiyordu. Bir görüş, hiçbir şey olmadığıydı, yani Samanyolu bir sonsuzluk okyanusunun ortasında bir varlık adası olarak düşünülüyordu (“ada evren” fikri); bazıları da, uzaklarda başka “ada”ların olabileceğini savunuyordu.

Ancak, bu konuda kafa yoran aydınların çoğu, bir ölçekte evrenin homojen olması gerektiğini düşünüyordu; dayanak noktası da “genelleştirilmiş Kopernik ilkesi” diyebileceğimiz bir fikirdi: Kopernik, dünyanın Güneş Sistemi içinde özel bir yer olmadığını göstermişti, bu önce dünyanın (ya da Güneş Sistemi’nin) **evrende** özel bir yer olmadığı, sonra da evrende **hiçbir** özel yer olmadığı şeklinde genelleştirildi. Bu ilke, halen zaman zaman başka yönlere doğru da genelleştirilerek kullanılmaktadır.

Burada, benim şöyle bir yorumum var: Avrupa’da Bilimsel Devrim süreci, bilimciler ve kilise arasında bir mücadele şeklinde geçti. Sonunda bilimciler kazandı, ama



Şekil 48. Güneş ya da benzeri bir yıldızın merkezinden geçen bir düzlemin geometrisinin üç boyuta “gömülmüş” hali. Burada yüzey düzlemden aşağıya sarkmış değildir, zaten buradaki “aşağı”nın bir anlamı yoktur. Bu diyagramın amacı, herhangi iki nokta arasındaki gerçek mesafeyi göstermektir. Diyagramdaki yüzeyin bir düzlemden sapması, eğriliğin getirdiği mesafe uzamalarını göstermek içindir.

uzun ve zorlu mücadele, örneğin Kopernik’in kitabını basmaya ancak ölüm döşeğinde cesaret edebilmesi, Galileo ve engizisyon, Giordano Bruno’nun yakılması vb. bilimcilerin ve aydınların ortak hafızasında izler bıraktı ve adeta kilisenin her dediği yanlış olmalı refleksi oluşturdu. Örneğin kilise dünyanın özel olduğunu (evrenin merkezinde ve evren dünyanın hâkimi olan insanlar için var) söylüyor, Kopernik de bunun yanlış olduğunu göstermiş, genelleştirelim. Biz özel değiliz, **kimse özel olmamalı**, öyleyse evren

homojen olmalı. Kilise evrenin bir başlangıcı olduğunu söylüyor[68], öyleyse evren ezelden beri var olmalı, yani durağan (hareketliyse hareket ne zaman başladı?) olmalı. Kilise evrenin sonlu olduğunu söylüyor (gökküre-büyük felek ile bitiyor), öyleyse sonsuz olmalı... Ayrıca, Newton'a göre kütleler birbirini çekiyor, sonlu bir evren bir noktaya toplanırdı; ama sonsuz ve homojen bir evren, belki durağan kalabilir, çünkü hangi noktaya toplanacak? Tüm noktalar aynı, birini tercih etmek için sebep yok ki...

68)İrlandalı Kardinal Ussher'in hesabına göre MÖ 4004, 23 Ekim; bu da tabii ayrı bir hikâye…

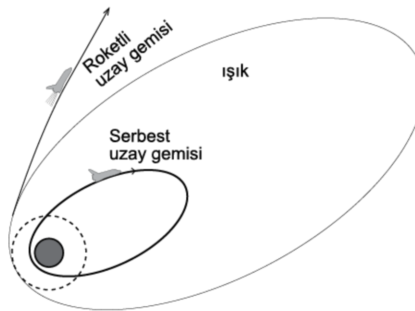
- *Ama üç özellik birden doğru da olamaz...*

- Olbers paradoksundan dolayı bunu biliyorlardı ama, hangisini atacaklar? Gözlemsel veri yok...

Einstein işe bir **kozmolojik ilke** formüle ederek başladı: **Evren homojen (türdeş) ve izotropiktir**, yani evrenin içinde her nokta ve bakabileceğin her yön aynıdır.

- *Neden homojenliği tercih etti?*

- Aslında Einstein'ın kişisel tercihi, hem homojenlik, hem durağanlık yönünde (tabii bu durumda evren sonlu olmak zorunda); ancak ilkeye durağanlığı katmıyor. Bu tercihlerin felsefi sebebini bilmiyorum; ama matematiksel şöyle bir sebebi var: Genel göreliliğin Einstein denklemlerini korkunç basitleştiriyorlar: Kozmolojik ilke, evrenin geometrisi için olasılıkları üç taneye indirgiyor. Yani sonsuz olası metrik (Soru 36) arasında kozmolojik ilkeyi sağlayanlar bu üçü. Aslında bu üçü ortak bir şekilde yazılabiliyor ve o zaman Robertson-Walker (RW) metriği deniliyor. Bu üçü **düz, açık ve kapalı** diye ayırt ediliyor. Ayrıca epey basitler.

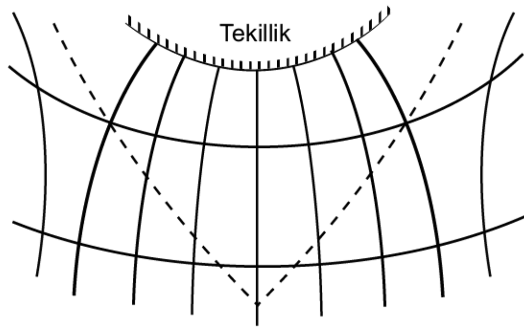


Şekil 50. “Siyah yıldız” ya da basit kara delik modeli, yani klasik fiziğe göre ışık hızıyla giden bir cismin bile sonsuza gitmesine izin vermeyecek kadar yoğun bir cisim. Bu model, gerçek kara deliği sonsuzdan görünmemek ve kritik yarıçap bakımından temsil edebilmekle beraber, birçok başka bakımdan iyi temsil edemez. (Metne bakınız.) Gerçek bir kara deliğin aksine, bu modelde kritik yarıçaptan içeri giren
bir cismin tekrar dışarı çıkma şansı vardır.

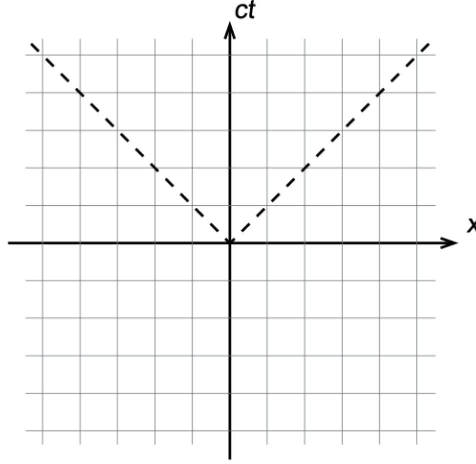
- *Nasıl basit?*

- Bu metrikler, olabilecek en simetrik üç boyutlu uzayların zaman ile genleşme veya büzülmesini betimliyor, içinde bilinmeyen fonksiyon olarak yalnızca bu genleşme veya büzülmeyi gösteren bir $a(t)$ fonksiyonu var. Bu olabilecek en simetrik üç boyutlu uzayların metrikleri, tek bir (uzayda) sabit eğrilik parametresine sahip; eğer bu parametre sıfır ise uzay düz, pozitif ise üç boyutlu küre (bildiğimiz küre yüzeyine iki boyutlu küre denir), negatif ise üç boyutlu hiperboloid (maalesef iki boyutlu hiperboloidi bile görsel olarak bire bir canlandırmak mümkün değil) olur. Bu üç boyutlu kürenin hacmi sonlu, diğerlerininki sonsuzdur. Yüksek simetri yüzünden bu uzaylarda özel bir nokta yoktur, önceki sorudaki pantograf örneği gibi, istenen nokta “merkez” olarak alınabilir.[69]gore

69)Bu Nasreddin Hoca’nın, papazların “Dünyanın ortası neresidir?” sorusunu, “Eşeğimin sol arka ayağının olduğu yerdir, isterseniz ölçün!” diye yanıtlamasına benzer. Hoca iki bakımdan haklıdır: Birincisi, dünya yüzeyinin bir sınırı olmadığından ortası da yoktur, dolayısıyla belli amaçlar için (harita yapmak gibi) istediğin noktayı merkez kabul edebilirsin; ikincisi, cevabını ölçerek teyit edemeyeceğimiz sorular çok anlamlı olmayabilirler.



Şekil 52. Bir kara delik uzay-zamanına ait bir zaman × uzay kesiti. Cisimler yukarıya doğru hareket ederler ve hareket yönleri, zaman yönündeki çizgilerden 45°’den fazla sapamaz. Ancak düz uzayın aksine, burada bu çizgiler birbirine yaklaşır ve bazıları “tekillik”te biter. Bu yüzden, kesikli çizgiyi yukarı geçen cisimler tekilliğe çarpmak zorundadır.



Şekil 51. Düz bir uzay-zamana ait bir zaman × uzay kesiti. Cisimlerin hareket yönü, zaman yönündeki çizgilerden 45°’den fazla sapamaz.

Şekil 51. Düz bir uzay-zamana ait bir zaman × uzay kesiti. Cisimlerin hareket yönü, zaman yönündeki çizgilerden 45°’den fazla sapamaz.

Bu metriklerde düz, açık ve kapalı ifadeleri tüm uzay-zamanı değil, üç boyutlu uzayı niteliyor; eğrilik parametresi ise, $a(t)$ fonksiyonu cinsinden veriliyor; Einstein denklemleri de 10 kısmi diferansiyel denklemden, $a(t)$ cinsinden iki adi diferansiyel denkleme indirgeniyor.

Bu arada, yalnızca metriği değil, maddeyi, yani Einstein denklemlerinin sağ tarafını da düşünmek gerek. Evrenbilimde evreni dolduran madde, bir **ideal akışkan** olarak modellenir. Gökadalar, böyle bir akışkanın “atomları” gibi düşünülür—

- *Ölçek farkının bundan çarpıcı bir ifadesi olmaz herhalde. Gökadalar evrenbilimciler için atom gibi...*

- Bir ideal akışkanın iki “özelliği” var: Yoğunluk ρ (burada enerji yoğunluğu-kütle dahil) ve basınç p. Örneğin, gökadaların oluşturduğu akışkan için $p = 0$ alınır (gökadaların aralarında etkileşim olmadığı için), ancak evreni dolduran elektromanyetik ışınım (bir diğer deyişle, foton gazı) içinse $p = \rho/3$ geçerlidir. $p = 0$’ı

sağlayan akışkanlara kısaca **madde** ya da **toz**, *p* = ρ/*3*'ü sağlayanlara da **ışınım** denir.

- *Einstein, evrenin durağan olması gerektiğini düşünüyordu demiştiniz?*

- Kozmolojik ilkeye durağanlık ve evrende **madde**nin baskın olması (ve tabii kapalılık) koşullarını ekleyince, elde edilen modele **Einstein evreni** deniyor. Ancak durağan demek, *a*(*t*) sabit demek; ama sabit *a*(*t*), pozitif ρ için denklemleri[70] sağlamıyor[71]!

70)Matematiksel ayrıntı isteyenlere: Einstein denklemleri bize sonuçta iki faydalı denklem verir. (10 denklemin kimisi 0=0, kimileri de birbirinin aynısı çıkıyor.) Bunların birincisi -. Bu denklemde

a(*t*), evrenin büyüklüğünün bir ölçüsü (örneğin belli bir uzak gökadanın bize uzaklığı), *v*(*t*), evrenin genleşme hızı (örneğin aynı gökadanın bizden uzaklaşma hızı), ρ(*t*), evrenin yoğunluğu, *c*, ışık hızı, κ da bir sabit anlamına gelmektedir. *k* ise, evrenin geometrisini gösteren bir parametredir. Kapalı evren için *k* = +1, düz evren için *k* = 0, açık evren için, *k* = -1 geçerlidir. *v/a* kesiri tabii ki Hubble parametresidir.

İkinci denklem ise -. Bu denklemde *i*(*t*), evrenin genleşme ivmesini, *p*(*t*) ise evreni dolduran maddenin basıncını gösteriyor.

71)Matematiksel ayrıntı isteyenlere: Denklemlere *v*(*t*) = *0*, *i*(*t*) = *0* (evrenin durağan olması) ve *p*(*t*) = *0* (evrenin madde-baskın olması) koşullarını koyarsak, ikinci denklem *k* = *0* verir. Bu hem ilk denklem ile [ρ(*t*) sıfır değil], hem de Einstein'ın kapalılık koşuluyla çelişir.

Bundan normalde çıkartılacak sonuç, evrenin durağan olamayacağı, yani genleşmekte ya da büzüşmekte olması gerektiğidir. Ancak, Einstein genel göreliliği henüz iki yıl önce geliştirmişti ve Merkür'ün yörüngesinin dönmesi konusundaki başarılı hesaba rağmen (Soru 39), kurama olan güveni, evrenin durağan olması gerektiği konusundaki inancı kadar güçlü değildi anlaşılan. Böylece Einstein evrenin durağan olmadığı sonucunu çıkaracak yerde, kuramda değişiklik yapma yoluna gitti.

- *Nasıl bir değişiklik?*

Einstein denklemlerinin çok karmaşık olduğunu söylemiştik (Soru 33)... Ama öte yandan, Einstein denklemleri belli kriterleri sağlayan en basit denklemlerdir. Einstein 1917'de ikinci en basit versiyonu kullanmanın daha uygun olduğuna karar verdi.[72]

72)Genelde, Einstein denklemleri çözdü, durağan çözüm olmadığını görünce denklemleri değiştirdi diye anlatılır. Halbuki orijinal makaleye bakınca, Einstein'ın çözümü kabul edip, denklemleri sağlayıp sağlamadığına baktığı görülür.

Bu iki versiyon arasındaki fark, orijinal denklemlere bir sabiti içeren bir terim eklenmesi. Bu sabit evreni anlamak bağlamında eklendiği için, **kozmolojik sabit** deniyor ve Λ (lambda) ile gösteriliyor. Orijinal

denklemler mesafe arttıkça azalan bir çekici kuvvet etkisi yaparken; kozmolojik terim, mesafe arttıkça artan bir itici kuvvet etkisi yapıyor. Etkilerin biri itici, biri çekici olduğundan, bir denge kurulup durağan bir çözüm bulunabiliyor.

- *Ama... eğer çekici etki mesafeyle azalıyorsa... itici etki de artıyorsa... bu denge kararsız olmaz mı?*

- Doğrudur, kararsız. Ama durağan çözüm bulmanın tek yolu bu... Zaten 1929'da Hubble evrenin genleştiğini keşfedince, Einstein, kozmolojik sabiti "evlatlıktan reddetti" ve denklemlerin ilk şekline döndü. Daha sonra bahsedeceğimiz ünlü fizikçi George Gamow, Einstein'ın kendisine kozmolojik sabitin hayatının en büyük hatası olduğunu söylediğini yazar.[73] Öte yandan Wheeler'in ifadesiyle "Şişeden çıkan yaramaz bir cini geri sokmak kolay değildir"; dolayısıyla babası reddetse de kozmolojik sabit kıyıda-köşede bazı bilimsel makalelerde yaşadı ve şimdilerde tekrar yıldız oluyor...

73)Ancak, Gamow'un şakacı kişiliğinden dolayı, bu ifadeyi kendisinin uydurmuş olabileceğini iddia edenler de vardır.

- *"Bir zamanlar fakir ama onurlu bir sabit vardı..." da diyecek mi bakalım ... Peki sonra?*

- Sonuçta Einstein evreni modeli ve kozmolojik sabit gündemden düştü... Aslında belki de Einstein'ın bir **birleşik alan kuramı** oluşturma konusundaki başarısız çabalarının da (Soru 32'nin sonlarına bak) etkisi ile genel görelilik de bir ölçüde gündemden düştü. Öyle ki, genel görelilik dışında kozmoloji kuramları bile ortaya çıktı...

43-Büyük Patlama (Big Bang) nedir?

- *Ne gibi?*

- 1948'de o zamanların önemli bilimcilerinden Hoyle, Gold ve Bondi, **mükemmel kozmolojik ilke** dedikleri bir ilke ortaya attılar. Bu ilke, evrenin (yerel özelliklerinin) yalnızca her yerde ve yönde değil, **her zamanda** da aynı olması gerektiğini ifade ediyordu. Ancak

evren, Hubble'ın keşfine göre genleşmekte olduğuna göre, bu yerel özelliklerden biri olan yoğunluğun sabit kalabilmesi için, evren genleştikçe yeni madde yaratılması gerekiyordu. Bu kurama **durağan hal**[74] kuramı dendi. Bu kuram, madde-enerji korunumunu ihlal ettiği için, otomatik olarak genel göreliliğin dışındaydı.

74)İngilizce: Steady state.

Bu arada, tabii ki genel görelilik çerçevesinde de evren modelleri yapılıyordu. 1922'de Friedmann, 1927'de Lemaitre, genleşen evren modelleri inşa ettiler. 1931'de Lemaitre evrenin bir "ilksel atom" ya da "kozmik yumurta"nın patlaması[75] şeklinde oluştuğu fikrini ortaya attı. 1948'de George Gamow, geçmişe gidildikçe evrenin yoğunlaşması, dolayısıyla sıcaklığının da artması gerektiğini işaret etti. Öyle ki, "başlangıca" yeterince yakın zamanlar, termonükleer tepkimeler meydana gelecek kadar sıcak olmalı ve bu tepkimelerin izleri günümüzde görülebilmeliydi... Tarih 1948, 2. Dünya Savaşı hafızalarda hâlâ çok taze... Dolayısıyla içinde "nükleer" geçen herhangi bir ifade, insanların aklına—

75)Buradaki patlama, İngilizce "explosion" kelimesine karşılık gelir.

- *Hiroşima'yı getiriyordu...*

- Biraz da bu yüzden, bu kurama karşı çıkanlar (yani durağan hal kuramı taraftarları) bu fikri, biraz da alaycı olarak, Büyük Patlama (Big Bang) diye nitelediler[76] ve zamanla bu deyim yerleşti.

76)Burada ise, patlama için "bang" kelimesi kullanılıyor. Aslında bu kelime, bir patlamanın bütününden çok, sesini anlatır; yani asıl anlamı "gümbürtü" ya da "gümleme" gibi bir şeydir; bu da alaycılığın bir parçası herhalde. "Big Bang"i Türkçe'ye "Büyük Patlama" diye çevirmek, Gamow öncesi ve Gamow sonrası fikirler arasında bir ayrım yapmadığından, biraz eksik kalıyor; ama bu biraz hafiflik kokan deyimi İngilizce, hem de bilim İngilizcesi kaldırabilirken, Türkçe'nin "Büyük Gümbürtü"yü kaldırabileceğini sanmıyorum.

- *İlginç... Demek kuramın adını taraftarları değil, karşıtları koydu...*

- Evet, bazen böyle şeyler oluyor. Bazı Kızılderili kabilelerinin kendileri için "insanlar" diye çevrilebilecek ifadeler kullandıklarını, başkalarının o kabileye isimlerini verdiklerini duymuştum...

Her neyse... Büyük Patlama kuramı, az önce sözünü ettiğimiz termonükleer tepkimelerin izlerinden başka bir öngörü daha yapıyor: Bu kadar geçmişe gidilmeyen zamanlarda bile evrenin içindeki madde, plazma halindeydi—

- *Plazma tam olarak nedir?*

- Yüklü parçacıkların oluşturduğu gaz... Bahsedilen şu: Evren genleşiyor, genleştikçe sıcaklığı düşüyor, başlangıçtan dakikalar sonra termonükleer tepkimeler bitiyor, çünkü çekirdeklerin termal hızları, aralarındaki elektriksel itmeyi yenip onları birleştiremiyor artık. (Nükleer kaynaşma, yani füzyon için çekirdeklerin birbirine değmesi gerekiyor). Sonrasında serbest, yani bir çekirdeğe dahil olmamış nötronlar bozunuyor (Serbest nötronun yarı ömrü yaklaşık 15 dakika, ama bir çekirdeğin içinde kararlı olabiliyor), ancak ortalık hâlâ atomların oluşmasını engelleyecek kadar sıcak, dolayısıyla evrenin içeriği elektronlar ve protonlardan ve diğer çekirdeklerden (ezici çoğunluğu helyum çekirdeği, yani alfa parçacığı) oluşan bir gaz halinde... Ancak, plazmanın şöyle bir özelliği var: Opak. Çünkü yüklü parçacıklar ışık ile kuvvetli bir şekilde etkileşiyorlar; ışık, yani fotonlar bu plazmanın içinde hareket ederken sürekli saçılıma uğruyor. Dolayısıyla bir bakıma fotonlar da bu plazmanın bir parçası. Bu durumun sürdüğü yüz binlerce yıl boyunca evrende olan tek şey genleşme ve soğuma. Ta ki, sıcaklık, hidrojen atomlarının oluşmasına izin verecek dereceye düşünceye kadar...

- *Kaç derecelerden bahsediyoruz?*

- Nükleer kaynaşma tepkimeleri için milyonlarca derece, hidrojen atomlarının oluşabilmesi için yaklaşık 3000 derece. Bu **atomlar oluşunca, artık evren saydam, çünkü atomlar toplamda nötr olduklarından, fotonlar artık saçılıma uğramıyor!** Korkunç miktarlarda foton (şimdi giremeyeceğim sebeplerden dolayı sayıları elektron ya da protonların yaklaşık yüz milyar misli) serbest kalıyor ve evreni dolduran bir **kozmik ardalan ışınımı** haline geliyor.

Bu fotonlar, ısıl dengede olan bir plazmadan serbest kaldıkları için, dağılımları termal; yani her frekans aralığında bulunan foton sayısı, belli matematiksel kurallara uyuyor. Evrenin genleşmesiyle onlar da kırmızıya kayıyorlar (frekansları düşüyor), ancak bu kayma, termalliği bozmuyor, yalnızca dağılımı belirleyen sıcaklık frekanslara paralel olarak düşüyor. Dolayısıyla Gamow, günümüz evreninde birkaç, belki onlarca Kelvin[77] mertebesinde sıcaklığı olan termal bir ardalan ışınımı öngördü.

77)Maddenin ulaşabileceği bir en düşük sıcaklık vardır. Bu sıcaklığa mutlak sıfır, buradan başlayarak ölçülen/tanımlanan (dolayısıyla hiçbir zaman negatif olamayan) sıcaklığa da mutlak sıcaklık denir.

Birimi Kelvin’dir. Aslında bu yalnızca Celcius ya da santigrat ölçeğinin uygun bir miktar kaydırılmış halidir: (Kelvin sıcaklığı) = (Celcius sıcaklığı) + 273,16. Genelde fizikte sıcaklık dediğimiz zaman mutlak, yani Kelvin sıcaklığını kastederiz ama az önce binlerce ya da milyonlarca dereceden bahsederken pek fark etmiyordu. Tabii burada fark ediyor.

- *Gözlemlendi mi peki?*

- Maalesef dünya atmosferi, elektromanyetik tayfın az bir kısmını geçiriyor; başlıca iki geçen frekans bölgesi, görünen ışık ve radyo dalgaları. Birkaç ya da onlarca Kelvinlik bir termal ışınım, mikrodalga bölgesine denk geliyor ve atmosferden pek geçmiyor. Yani gözlemlemek için ya antenin çok duyarlı olacak ya da atmosferin münkün olduğu kadar üstüne çıkacaksın...

- *Uzaya yani...*

- İdeali o ve sonunda öyle yapıldı. Ama başlangıçta duyarlı antenler ya da üst atmosfere çıkabilen balonlara yerleştirilen detektörler kullanıldı...

- *Anlaşılan bulundu sonunda...*

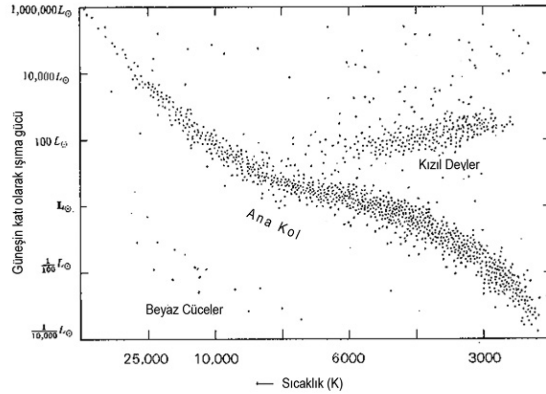
- Evet ama, arayanlar tarafından değil. 1964’te bir Bell Telefon Laboratuvarı ekibi, uydularla iletişim (uzay yarışının başlangıç zamanlarından bahsediyoruz) ve radyoastronomi için duyarlı bir mikrodalga anten sistemi yaptı. Ama bir türlü kurtulamadıkları, her yönden gelen bir parazitle karşılaştılar. Parazitin kaynağı olabilecek bir sürü olasılığı değerlendirdiler; örneğin acaba insan faaliyetleri, yani şehirler bu parazite neden olabilir miydi? Bir noktada, içi boş bir boynuz şeklindeki antenin içine güvercinlerin yuva yapıp, antenin içini “yapışkan beyaz bir dielektrik madde” ile kapladığını gördüler. Güvercinleri kışkışlayıp, yapışkan beyaz dielektrik maddeyi temizlemek de problemi çözmedi. Bu arada, yakınlardaki Princeton Üniversitesi’nde kozmik ardalan ışınımını gözlemlemeye çalışmak için benzer teknolojili bir çalışmanın planlama aşamasında olan bir ekip, durumdan haberdar oldu. İki ekibin bir araya gelmesiyle, Bell ekibinin gördüğü “parazit”in aslında bu ışınım olduğu anlaşıldı.

Böylece Büyük Patlama kuramı üstünlük sağladı, durağan hal kuramı geri plana düştü; Bell ekibinin liderleri olan Penzias ve Wilson, 1978’de Nobel adılar. Ancak bu ışınım atmosferden pek geçmediğinden, ışınımın gerçekten termal olduğuna ikna edecek kadar farklı frekansta ölçüm yapılamamıştı; bu şüphe de COBE

uydusunun atmosfer dışından gözlemlere başlamasının ilk birkaç dakikası içinde tamamen giderildi...

- *Önemli ve etkileyici; ama yalnızca kozmik ardalan ışınımının keşfi mi Büyük Patlama kuramını destekliyor?*

- Tabii arkasında önemli bir kuramsal destek var; genel görelilik ile parçacık fiziğinin **standart model**ini bir araya koyunca, pek bir alternatif kalmıyor. Ayrıca kurama adını veren nükleer tepkimelerin de izleri gözlenebiliyor: Bu tepkimelerde oluşması beklenen helyum, lityum, berilyum ve bor miktarları bilgisayar programları ile bir parametre (evrendeki foton/baryon sayıları oranı)



Şekil 53. Hertzsprung-Russel diyagramı. Yıldızların sınıflandırılmasında kullanılır. Her yıldız bir nokta ile temsil edilir ve bir yıldız ne kadar sıcaksa o kadar solda, ışıma gücü ne kadar yüksekse o kadar yukarıda gösterilir. Sonuçta yıldızları temsil eden noktalar diyagramı düzgün olarak doldurmayıp, üç ana grup halinde bulunur. Sonradan bu grupların farklı fiziksel anlamları da anlaşıldığından, yıldızlar böyle sınıflandırılır.

cinsinden hesaplanabiliyor. Ayrıca bu miktarları ölçmek de mümkün; ancak bu oranlarda astrofiziksel mekanizmalarla oluşacak değişiklerin (örneğin yıldızlarda olası sentezlenme) modellenip hesaba katılması ya da ölçümlerin böyle değişikliklerin olmadığını düşünebileceğimiz yerlerde yapılması gerekiyor. Zor hesaplar ve ölçümler bunlar, ama uyuştukları bir foton/baryon oranı bulunabiliyor. Durağan hal fikrinde ise, evrenin kimyasal bileşiminin zamanla değişmemesi gerekiyordu...

- *Peki, geçmişi büyük ölçüde anladık; ya gelecek?*
- Bunu kara deliklerin sonrasına bırakalım istersen...

7. Bölüm - KARA DELİKLER

44-Kara delik nedir?

- *Kara delik tam olarak nedir?*

- En basit tanımıyla, “çekimi” ışığın bile kaçmasına engel olabilecek kadar kuvvetli olan bir cisim.

- *Bu yüzden “kara”, değil mi?*

- Eh, tabii... Ancak bu basit tanım, yalnızca benim “Newton × Newton × Newton ” ya da “Newton-küp” diye tabir ettiğim fizikte anlamlı; yani Newton’un mekanik, genelçekim ve ışık kuramları kabul edilirse—

- *Newton’un ışık kuramı da mı var?*

- Eski Yunanlılar, ışığın gözden çıkan bir şey olduğuna inanıyorlardı. Bunun tersi, yani ışığın görülen cisimlerden göze gelen bir şey olduğu ve çok küçük, çok hızlı parçacıklardan oluştuğu 11. yüzyılda İbni Heysem tarafından ortaya atıldı. 17. yüzyılda da ışığın ilk dalga kuramı ortaya çıktı. Newton ise parçacık kuramını benimsedi ve ışığın kırılmasını, kırma indisi yüksek ortamların ışık parçacıklarını daha kuvvetli çekmesi ile açıklamaya çalıştı.

İşte bu çerçevede, ışığını tutacak kadar kuvvetli çekimi olan bir cisim düşünmek mümkün ve düşünüldü... 1784’te, sonradan unutulan bir makalesinde Michell ve 1796’daki bir kitabında Laplace bu tür cisimlerden bahsederler. Hatta Michell, daha sıradan bir yıldızdan gelen ışığın yavaşlayacağını, eğer bir yıldızdan gelen

ışığın hızını ölçmek mümkün olursa, o yıldızın kütle/yarıçap oranının bulunabileceğini yazar...

İşin ilginci, “kendi ışığını tutan” cisimlerin yarıçapı bu çerçevede hesaplanınca, çok sonradan “kara deliğin yarıçapı” olarak nitelenen ifade bulunuyor.

- *Nasıl yani? Işık kuramı büyük ölçüde yanlış, klasik mekaniğin ışığa uygulanamaması lazım, çekim kuramı da bu şartlarda uygulanamamalı, ama sonuç doğru mu çıkıyor?*

- Biraz “sonuç”tan ne anladığına bağlı; ama kabaca, evet. Yani, bir “ışık parçacığı”nın, *M* kütleli, *r* yarıçaplı, küresel simetrik bir cismin yüzeyinden sonsuza gidebilmek için kazanması gereken “potansiyel enerji”nin, sahip olduğu “kinetik enerji”den fazla olması şartı, -

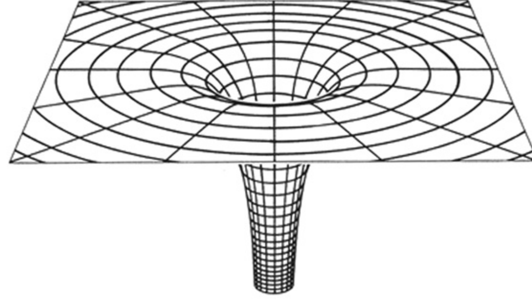
çıkıyor.[78] Bu da, daha sonra modern tanımda bulacağımız ışığın kaçamadığı yarıçap ile aynı; ama aslında “yarıçap”ın tanımı bile hafif farklı.

78)Bunun hesabı şöyle: “Işık parçacığı”nın, cismin yüzeyindeyken, sonsuza göre potansiyel enerjisi -, hızı *c* olduğu için kinetik enerjisi -. (Bu iyice yanlış tabii.) Sonra bunların toplamının pozitif olma, yani parçacığın sonsuzda bile kinetik enerjisi olma şartına bakarak, metindeki ifadeyi buluyoruz. Demek ki burada yanlışlar birbirlerini götürüyor.

- *O kadar basit olmayan tanımları da var anlaşılan...*

- Eh, tabii... Gerçekte “çekim” yok, hatırlıyor musun? Soru 35’e bakabilirsin. Dolayısıyla genel görelilik, yani geometri cinsinden de bir tanımı olmalı; değil mi? Genel görelilik de bize, madde-enerjinin uzay-zamanı eğeceğini söylüyordu. Örneğin Güneş veya benzer bir yıldızın olduğu yerdeki bir uzay-zaman kesitinin gerçek geometrisini üç boyuta “gömersek”, Şekil 48’i elde ederiz...

İşte kara delikler bu eğriliğin çok yüksek olduğu durumları temsil eder: Kütle-enerji uzay-zamanı o kadar eğmiştir ki, bir “delik” açmıştır· (Şekil 49)



Şekil 49. Bir kara deliğin merkezinden geçen bir düzlemin geometrisinin üç boyuta "gömülmüş" hali. Bunu şekil 48'in bir uç hali olarak düşünebiliriz. Yüzey, merkeze ulaşmıyor, ortası boş. Bu yüzden "delik."

- *Bu mudur kara deliğin modern tanımı?*

Genel görelilikte kara delik diye "olay ufku" ile çevrili cisme/bölgeye denir.

- *Ama bir tanımı başka bir tanımla yaptınız... "Olay ufku" nedir?*

"Olay ufku", cisimlerin -ışık dahil- bir yönde geçebildikleri, ama diğer yönde geçemedikleri yüzeylere denir.

- *Galiba basit tanımla aynı kapıya çıktı...*

- Hayır, çıkmadı... Basit ya da klasik, ya da benim tabirimle "Newton-küp" çerçevesindeki ilgili cisimlere "siyah güneş" diyelim; bunlarda "girişi olan ama çıkışı olmayan" bir yüzey yoktur. Örneğin Şekil 50'de gösterildiği gibi, siyah güneşin yarıçapı, ışığın sonsuza kaçabildiği ve kaçamadığı bölgeleri ayıran kritik değerden (şekildeki kesik çizgili daire) küçük olsun. Bu durumda uzay geminle elips biçiminde bir serbest, yani yakıt yakmadan takip edilebilecek bir yörüngede (şekildeki küçük elips) dolaşıp, bu değeri bir içeri, bir dışarı geçebilirsin. Işığın sonsuza ulaşamayacak olmasına rağmen (bir örnek, şekildeki büyük elips), yeterince kuvvetli roketlerin varsa, sen roketlerini sürekli ateşleyerek sonsuza varabilirsin...

- *Anlamadım; evrende böyle cisimler mi var?*

- Tabii ki yok, çünkü "Newton-küp" çerçevesi geçerli değil, özellikle bu şartlarda; yani ışığın hareketi ve kuvvetli "çekim" söz konusu olunca... Bunu, basit modelin yetersizliklerini vurgulamak, bir diğer deyişle, gerçek kara delik ile farklarını göstermek açısından anlattım.

- *Şu "olay ufku"nu biraz daha açsak...*

- Küresel durum için anlatayım: Olay ufku öyle bir (matematiksel) yüzeydir ki, *r* koordinatı, dışarıda uzaysal, içeride zamansaldır; bir diğer deyişle bu koordinat ile ilgili metrik katsayısı dışarıda pozitif, içeride negatiftir. (Bkz. Soru 23.) Olay ufkundan içeride yarıçap koordinatı zamansal olduğuna ve zaman da "gitmek zorunda olduğumuz yön" olduğuna göre, merkeze doğru gitmek zorundayız... Çünkü artık merkez, bizim biraz ötemizdeki değil, geleceğimizdeki bir yer... Bu yüzden olay ufku geçilirse, geriye dönüş yok... Geçmişe dönüş olmadığı gibi...

- Hazmetmesi bayağı zor... Bunu açıklayacak bir grafik var mı?

- Şöyle anlatayım: Kütle-enerji, yalnızca uzayı değil, uzay-zamanı da eğer... 48 ve 49. şekiller uzaysal düzlemlerdi, yani uzay × uzay kesitleriydi (örneğin, *r*-φ). Şimdi zaman × uzay kesitlerini düşünelim (*r*-*t*). Şekil 51, düz bir uzay-zamanın *r-t* kesitini gösteriyor, Şekil 52'de bir kara delik uzay-zamanının. Şekil 51'de ışık 45°'lik yollar izleyecektir (örneğin kesikli çizgiler) ve cisimler de genel olarak yukarı giden çizgilere yakın yollar izler. Yönleri dikeyden 45°'den fazla sapamaz. Kara delik uzay-zamanında ise, bu çizgiler, yani zamanın akış yönü ortaya doğru bükülmüştür; ve çizgilerin bazıları merkezdeki tekillik[79] dediğimiz yerde biter. Olay ufkunu temsil eden kesikli çizgileri geçersen, "zamanın akış yönü" ile 45° açı yapmak bile, tekilliğe çarpmaktan seni kurtaramaz.

79)İngilizce: Singularity.

- *Zamanın akış yönü eğiliyor, bir anlamda değişiyor öyle mi?.. Bunu da sindirmesi zor...*

Ama olan bu. Kara deliğin yaptığı bu. Uzay-zamanda çok çarpıcı bir etki; bunu -ne kadar tecrübelerimize, içgüdümüze aykırı gibi görünse de- anlamadıkça ya da kabullenmedikçe kara delikleri anlayamayız...

- *Anlar gibiyim... Peki tekillik ne?*

- Kabaca, uzay-zamanda eğriliğin sonsuz olduğu yer…[80] Eğri uzayda paralel başlayan jeodeziklerin paralel kalmadığını hatırla (Soru 36). Eğriliğin sonsuz olması, bu paralellikten sapma eğiliminin de sonsuz olması demektir. Uzay-zamanda jeodezikler, üzerine kuvvet etki etmeyen cisimlerin yolları olduğuna göre; grup halinde giden (her şey gidiyor, uzay-zamanda sabit duramazsın) parçacıklar,

uzay-zaman eğriyse ya dağılma, ya sıkışma eğiliminde olmalı. Cisimlerin üzerine kuvvet etki ediyorsa da bu etki vardır, ama tabii o zaman tek etki değildir. Hatta, bu etki genellikle bir boyutta (diyelim *x*) dağılma, bir boyutta (diyelim *y*) sıkışma şeklinde olur ve gelgit etkisi[81] adı verilir.

80)Bunun tam ifadesi, o nokta, eğri ya da yüzeyde Riemann eğrilik tensörünün tüm koordinat sistemlerinde en az bir bileşeninin sonsuz olmasıdır.

81)Eski dilde: Med-cezir, İngilizce: Tidal effect ya da tidal force. Bu isim verilmesinin nedeni, Ay'ın çekim kuvvetinin Dünya'nın hacmi içinde sabit olmamasının, Dünya'yı Ay yönünde uzatmaya, Ay'a dik yönde de sıkıştırmaya çalışan bir etki yaratıp, suların bundan karalara göre daha fazla etkilenmesi sayesinde, Ay'a bakan ve aksi yüzde okyanus sularının yükselip, Ay'ı ufukta gören yerlerde alçalmasıdır. Ancak, bunun için gerekli su hareketi iç denizlerde pek mümkün olmadığından, biz Türkiye'de gelgit gözlemlemeyiz. (Karadeniz'in sularının 6 saatte 3 m alçaldığını düşünün. Bu kadar suyu bu sürede Boğazlar tahliye edemez.)

İşte tekillik, bu gelgit etkisinin sonsuza gittiği bir yerdir. Dolayısıyla tekilliğe yaklaşan bir cisim, gittikçe, sınırsız olarak artan bir gelgit etkisine maruz kalır, uzayıp incelir ve sonunda parçalanır. Zaten tekilliğin ötesine de uzay-zaman metriği matematiksel olarak devam ettirilemez. Bu yüzden, bazı çok özel durumları da kapsayabilmek için, çok kuramsal analizlerde tekillik, “jeodeziklerin devam ettirilemediği yer” olarak tanımlanır. Bu durumda da, kelimenin tam anlamıyla tekillik, “uzay-zamanın bir sınırı” olmuş olur. Yani, yine bir anlamda, delik...

İşin ilginci, bunların netleşmesi epey zaman aldı. Netleşene kadar, insanların birçoğu, olay ufkunu da tekillik sandılar. Çünkü orada metrik katsayılarından biri sıfır, biri sonsuz oluyordu—

- *Neden? Hangi metrik? Biz, genelde metrik kavramından bahsediyorduk, hiç özel bir metrik ifadesi yazmadık ya da konuşmadık ki...*

- Haklısın, ben işin tarihini Michell ve Laplace'da bıraktım. Onlardan bir süre sonra, ışığın dalga kuramı baskın çıktı. (Daha sonra dalganın elektromanyetik olduğu anlaşıldı.) Bir dalganın da genelçekimden etkilenmesi için bir neden olmadığından, “ışığını kaçırmayan cisim” kavramı, kuramlara aykırı hale geldi. Bu ancak kuantum fiziğinin yeşermeye başlayıp, ışığın tanecikli yapısının da olduğunun anlaşılmasıyla (1905, yine Einstein) değişti. Ancak, ışığın hızı değişmeyip, **foton**un enerjisi, dolayısıyla frekansı değişebilirdi.

Ancak, zaten 1915'te genel görelilik gelişip, 1916'da Schwarzschild çözümü yayımlanınca, böyle ara çözümlere gerek kalmadı—

- *Schwarzschild?*

- Soru 33'te bahsettiğimiz gibi, Einstein denklemleri son derece karmaşıklar, o kadar ki, 1915'te Einstein bunları geliştirmesinin ardından, ömrü boyunca çözüm bulunamayabileceğini düşündüğünü söylemiş derler. Ama boşluk, küresel simetri ve orijinden uzakta düz olma koşulları kabul edilirse, denklemler basitleşiyor. Bu da, noktasal bir kütlenin etrafındaki geometriyi bulmaya karşılık geliyor, bu işi de Schwarzschild[82] yapmış.

82)Schwarzschild, önemli bir fizikçi ve astronom olmasına ve 41 yaşına rağmen, 1914'te savaş başlayınca orduya katılmış. 1915'de Rus cephesinde topçu subayı olarak görev yaparken, bir taraftan da bilimsel çalışmalarına devam etmiş. Einstein denklemlerini okuyunca, yukarda bahsettiğimiz durumda basitleşeceğini görmüş ve denklemlerin Einstein'ı şaşırtan ve sevindiren ilk çözümünü bulmuş. Daha sonra bir çözüm daha bulmuş; o dönemde bir de kuantum fiziği konusunda önemli bir çalışması var. Ancak cephede, nadir rastlanan bir bağışıklık sistemi hastalığına yakalanıp, 1916 Mayıs'ında ölmüş. Kimi kaynaklar, bu çalışmaların en azından bir kısmını hasta yatağında yaptığını yazar...

İşte bu çözümde, *r* ve *t* koordinatlarına ait metrik katsayıları, *r*'nin fonksiyonları, ve -'de işaret değiştiriyorlar. Yani pozitif-negatif arasında geçiş yapıyorlar. Dolayısıyla *r* koordinatı, artık Schwarzschild yarıçapı (r_S) denen bu yarıçapla belirlenen yüzeyin dışında uzaysal, içinde zamansal. Yani yukarıda konuştuklarımız ışığında, bu yüzey bir olay ufku. Dolayısıyla Schwarzschild çözümü ya da metriği, bir kara delik uzayını betimliyor. En basit olanını.

Ancak, $r = r_S$'de bu katsayıların birisi sıfırdan geçerek işaret değiştirirken, diğeri +∞'dan -∞'a geçiyor[83]. İşte bu sonsuzluklar, insanların kafalarını karıştırdı ve Schwarzschild yarıçapının da bir tür tekillik olduğunu düşündürdü. Ayrıca hesaplar gösterdi ki, uzaktan bakan bir gözlemci, kara deliğe düşen cismin olay ufkuna varma süresini sonsuz olarak görür, örneğin bu cisim bir uzay gemisi ise, gemideki olayların -yani geminin zamanının- gittikçe yavaşladığını, olay ufkunda bu yavaşlamanın sonsuz mertebeye ulaştığını gözlemler. Bu da "karanlık yıldız" ya da "donmuş yıldız" isimlerinin kullanılmasına ve olay ufkunun zaten ulaşılamayacak bir yer olarak düşünülmesine yol açtı.

83)-fonksiyonunun $x = 0$'da yaptığı gibi.

Bu yaklaşım 1960'larda değişmeye başladı. John Wheeler ve çalışma arkadaşları, olay ufkunda eğriliğin (tam olarak Riemann eğrilik tensörünün) hiçbir bileşeninin sonsuz olmadığı koordinat sistemleri bulunabileceğini vurgulamaya başladılar. Yani olay ufkunda eğriliğin bazı bileşenlerinin sonsuz çıkması yalnızca, merkezden uzakta iyi bir seçim olan *r* ve *t* koordinatlarının, uzay-zamanın tümü için iyi koordinatlar olmamasından[84] kaynaklanıyordu...

84)Uzayda bir sorun olmadığı halde, koordinatların sorunlu gibi gösterdiği bir örnek, bildiğimiz iki boyutlu düzlemdeki kutupsal (polar) koordinatlardır. Bu örnekte, açı koordinatın metrik katsayısı orijinde sıfır olur, ama geometrik olarak orijinin diğer noktalardan bir farkı yoktur. (Bu sıfırın sebebi, orijinin açı koordinatının belirsiz olmasıdır.)

- *Olay ufkunda gerçek sonsuzluklar olMAmasının fiziksel sonuçları olmalı...*

- Sonlu bir yarıçaptan serbest düşen bir cismin olay ufkuna ulaşması için gereken özzamanın sonlu olduğu zaten biliniyordu. Bu cisim bir uzay gemisi olsa, mürettebatın kollarındaki saatler sonlu bir sürenin geçtiğini gösterir; *t* koordinatındaki değişmenin sonsuz olması mürettebatı pek ilgilendirmez, hayatlarını değiştirmez; yani fiziksel olarak çok bir anlamı yoktur. Daha da önemlisi, mürettebat gelgit etkisinin gittikçe arttığını hisseder, ama olay ufkunda özel bir artış hissetmez; hatta olay ufkundan geçtiklerini fark etmeyebilirler bile. Ancak tekilliğe vardıklarında, gelgit etkisinin gücü sonsuza ulaşacaktır.

- *Bu etki sonsuza doğru büyürken uzay gemisine bir şeyler yapar herhalde...*

- Gelgit etkisi yeterince büyüdüğünde düşen tüm cisimler uzayıp incelmeye başlar, tabiri caizse, spagetti gibi olurlar. Ancak belli bir cismin hangi noktada parçalanacağı, cismin sağlamlığı ve kara deliğin kütlesine bağlıdır; ama olay ufkundan dışarıda ya da içeride olur diye bir şey yok.

Sonuçta olay ufkunda fiziksel bir problem olmadığı anlaşılıp, dikkat merkezdeki tekilliğe yoğunlaştı. Bu durumu daha iyi ifade etmek için Wheeler, 1967'de **kara delik** deyimini icat etti. "İsmin ne önemi var" diye[85] düşünülebilir, ama bazen bir nesneyi ya da kavramı nasıl adlandırdığınız, algılanışta çok fark yaratır[86]; bu ifade Schwarzschild

çözümünün daha iyi anlaşılmasına ve ciddiye alınmasına yardım etti. 1970'lerden başlayarak, gerek kara delikler, gerekse evrenbilim (kozmoloji) konusunda sürekli kuramsal ve gözlemsel ilerlemeler ile genel görelilik, fiziğin merkezine yaklaştı...

85)*Romeo ve Juliet*, Shakespeare, Perde 2, Sahne 1.

86)NMR'ın isminin tıpta MR ya da MRI olarak değiştirilmesini örnek verebiliriz.

45-Kara delik nasıl oluşur?

- *"Kara delikler şu kütlede olur" diye bir şey yok galiba... Schwarzschild yarıçapının formülüne göre her kütle için bir yarıçap bulunabiliyor da...*

- Doğrudur... Herhangi bir kütleyi kendi Schwarzschild yarıçapının içine sıkıştırırsan, kara deliğe dönüşür. Örneğin, Güneş 3 km yarıçapında bir küreye sıkışırsa, bir kara deliğe dönüşür. Dünyayı yaklaşık 1 cm, beni ise 10^{-25} m yarıçapında bir küreye sıkıştırarak kara deliğe dönüştürebilirsin.

- *Ama ben hiç kara delik üretildiğini duymadım. Yüksek kütleli yıldızlar ömürlerinin sonunda kara deliğe dönüşüyorlarmış galiba... Bir yıldızın ömrü de ne demekse...*

- Etrafımızdaki bir cismi alıp sıkıştırmaya çalıştığınızda, bir noktadan sonra korkunç bir dirençle karşılaşır ve bu yoğunluklara ulaşamazsınız.

- *Bu direnç nereden kaynaklanıyor?*

- Normal yoğunluklardaki bir gaz için termodinamik (yani atom ya da moleküllerin hareketinden kaynaklanan) basınç önemli ve sıkıştırdıkça bu basınç artıyor. Katılarda ise, iki atomu normal kimyasal bağ uzunluğundan daha fazla yaklaştırırsan, atomlar birbirini kuvvetle itiyor, bu da bize direnen bir basınca sebep oluyor.

- *Bu itmenin nedeni ne?*

- Atomlarda elektronlar, çekirdeğin etrafında **orbital** denen bölgelerde bulunurlar. Kimya dersinde bulut gibi çizimler görmüşsündür; kimyasal bağ denen şey de zaten iki atomun bir orbitali ortak kullanmalarıdır. Haliyle bu orbitaller negatiftir;

dolayısıyla iki atom aralarındaki normal mesafeden daha yakın olmaya zorlanırsa, birbiriyle önce orbitaller etkileşir ve birbirlerini iterler.

- *Ama bu orbitallerden elektronlar dışarı kaçamıyor mu? Elektron torbası mı bunlar?*

- Aslında bir anlamda öyle. Çünkü kuantum fiziğinin temellerinden Pauli ilkesi, elektronların hemcinsleriyle aynı “kuantum durumu”nu paylaşmalarını yasaklıyor. Zaten kuantum ilkeleri uyarınca, elektron şuradadır-buradadır diyemiyorsun, ancak olasılıklar bilinebiliyor. Bu olasılıkları hesaplamak için gereken büyüklük, **Schrödinger denklemi** denen bir “dalga denklemi”ni sağlıyor ve orbitaller bu denklemin belli enerji düzeylerine karşılık gelen çözümleri; bir anlamda “olasılık bulutları.” Sonuç olarak, elektronların zaten belli konumları olmadığı için, elektronların değil, orbitallerin etkileşimi cinsinden düşünmek zorundayız.

Ancak, yeterince yüksek bir dış basınç olursa, orbitaller sonunda parçalanır ve elektronlar ve çekirdeklerden oluşan bir gaz, yani bir **plazma** oluşur. Bu durumda, Pauli ilkesi elektron gazına uygulanır. Birbirlerine yaklaştıkça, kuantum halleri de haliyle yaklaştığı için, ek bir direnç oluşur. Bu direnci yenebilecek bir kompresörümüz yok (olsa da o basınca dayanacak kabımız yok), en azından şimdilik. Bu dirence **Fermi basıncı** deniyor.

- *Neden Pauli ilkesini elektronlara uyguluyoruz da, çekirdeklere uygulamıyoruz?*

- Aslında uygulayabiliriz ama, bir gazın Fermi basıncı, gazı oluşturan parçacıkların kütlesi büyüdükçe düşüyor. Elektronların kütlesi, çekirdeklerden çok daha küçük (ve sayısal yoğunlukları da benzer, ya da daha büyük) olduğu için önce onların Fermi basıncı devreye giriyor.

- *Bu Fermi basıncı, kara delik oluşturacak yoğunluklara ulaşılamayacağı anlamına gelmiyor herhalde... Kara delikler önemli bir araştırma konusu olduğuna göre...*

- Kara delik oluşturacak yoğunluk diye belli bir rakam yok ki. Şimdi, yoğunluk, kütle/hacim, değil mi? Kara delik oluşması için kütlenin Schwarzschild yarıçaplı bir hacme sıkışması gerekiyor. Ama her kütlenin Schwarzschild yarıçapı farklı, kütle ile orantılı. Hacim de

yarıçapın küpüyle, dolayısıyla kütlenin küpüyle orantılı olduğundan, kütle büyüdükçe, kara delik oluşumu için gereken eşdeğer yoğunluk azalır.[87] Dolayısıyla daha büyük kütlelerin kara deliğe dönüşmesinin daha kolay olması beklenir. Zaten yüksek kütleli cisimlerde (yıldızlar gibi), genelçekimden yardım alabiliriz: Bir cismin kütlesi yeterince büyükse, farklı parçaları arasındaki çekim, cismi bizim elimizdeki herhangi bir kompresörden daha iyi sıkıştırabilir—

87)Daha matematiksel olarak: -. (Eğri uzay olduğu için - yazamıyoruz, ancak V, r_S^3'e orantılıdır diyebiliyoruz.) Sonuçta r_S'de m'e orantılı olduğundan, -, yani - çıkıyor.

- *O zaman belli bir kütlenin üzerindeki yıldızlar neden hemen kara deliğe dönüşmüyor?*

- Sahip oldukları (düşük) yoğunlukta termodinamik basınç, onları "çekim"e karşı dengede tutuyor da ondan; bu yoğunluklarda Fermi basıncı etkin değil. Bu termodinamik basınç da sıcaklık sayesinde var. Ancak yıldız sürekli uzaya ışıma yaptığından ısı enerjisi kaybediyor, bu enerji yerine konmasaydı sıcaklığı azalır, bu yüzden termodinamik basınç da azalır ve "çekim" üstünlük sağlayıp, yıldızı küçültüp yoğunlaştırırdı. Yıldızı dengede tutmak için gerekli enerji üretimi, merkezdeki yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında oluşan çekirdek kaynaşması (nükleer füzyon) tepkimeleri sayesinde olur. Bizim Güneş'i alalım; merkezinde her saniyede 600 milyon ton hidrojen bu tepkime ile 596 milyon ton helyuma dönüşüp, aradaki kütle farkından 4×10^{26} Joule enerji çıkıyor. (Hiroşima bombasında 1 g kütle enerjiye dönüşmüştü!)

- *Saniyede 600 milyon ton hidrojen harcıyor... Bu sıcağa kar dayanmaz...*

- Endişeye gerek yok, Güneş'te daha 6 milyar yıl yetecek hidrojen var; ama eninde sonunda o da bitecek. Hidrojen bitince de yıldızın "normal ömrü" diyebileceğimiz "ana kol[88] evresi" bitiyor—

88)İngilizce: Main sequence.

- *Neyin ana kolu?*

- Konumuz yıldız fiziği değil; ama yıldızları sınıflandırmak için Hertzspung-Russel diyagramı diye bir yöntem var. (Bkz. Şekil 53.) Burada yıldızlar bir dikdörtgenin içinde noktalarla temsil ediliyorlar ve büyük çoğunluğu diyagramı köşegen gibi geçen bir kuşak üzerinde bulunuyor, bu kuşağa "ana kol" deniyor. Sonradan bu yıldızların,

yıldız yaşamının en kararlı evresine, yani hidrojen kaynaşması ile enerji ürettiği evreye karşılık geldiği anlaşıldı... Bu arada, daha yüksek kütleli yıldızlar, hidrojeni Güneş'ten çok daha hızlı tüketiyorlar; dolayısıyla yıldızların kütleleri yükseldikçe, ömürleri kısalıyor. Ben bunu bir "kamyon arkası ifadesi" ile "Büyük yıldızlar hızlı yaşar, genç ölür" diye ifade etmeyi seviyorum.

- *Bu evreden sonra ne oluyor? Ölüm mü? Madem kamyon arkası ifadelere girdik, cesetler nasıl oluyor?*

- Hidrojen bitince enerji üretimi de bitiyor, ışıma ile ısı kaybeden yıldızda yukarıda bahsettiğimiz gibi "çekim" termodinamik basınca üstünlük sağlıyor ve yıldız küçülüp yoğunlaşmaya başlıyor. Biz buna "çökme" diyoruz. Ancak bu çökme sıcaklığı tekrar arttırıyor. Bu süreç, iki şekilde bitebiliyor: Yeterince düşük kütleli yıldızlarda[89] elektron Fermi basıncı devreye girip, çökmeyi durdurabiliyor; diğerlerinde daha o devreye girmeden sıcaklık, helyum çekirdeklerini kaynaştıracak seviyeye çıkıyor.

89)Bir yıldızın sahip olabileceği en düşük kütle, 0,08 güneş kütlesidir.

- *Neden helyum çekirdeklerinin kaynaşması hidrojenden daha yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyuyor?*

- Yükleri daha fazla olduğundan, birbirlerini daha şiddetle itiyorlar, dolayısıyla güçlü nükleer kuvvetin kaynaşmayı başlatması için birbirlerine "değmeleri", daha yüksek hızlarla hareket ediyor olmalarıyla mümkün. Bu da daha yüksek sıcaklık demek. Bu mantık daha büyük çekirdeklere doğru genelleştirilebiliyor.

- *Çökme durursa ne oluyor, helyum çekirdekleri kaynaşmaya başlarsa ne oluyor?*

- Çökme durursa yıldız yeni bir denge durumuna ulaşmış oluyor, bu bir tür "yıldız cesedi" işte. Bu tür cisimlere, yani "çekim"in elektron Fermi basıncı ile dengelendiği cisimlere, **beyaz cüce** deniyor—

- *Neden "beyaz cüce"?*

- "Cüce", çünkü çekirdek tepkimelerinin bitmesinden sonra yıldız çökmeye başlıyor ve elektron Fermi basıncı devreye girene kadar bayağı küçülmüş oluyor. Örneğin, bizim Güneş, beyaz cüce olduğunda, yaklaşık dünya boyutlarına inecek; yani bir kesmeşeker kadar parçasının kütlesi yaklaşık bir ton olacak…

- *Yani Güneş de beyaz cüce olacak...*

- Evet, sonunda beyaz cüce olacak, ama biraz daha uzun bir yoldan geçerek... "Beyaz"ı da anlatayım, sonra devam ederiz...

Bu büyük oranda küçülme, yıldızı, tekrar kaynaşma tepkimeleri başlatacak kadar olmasa bile, ısıtıyor. Bir yıldızın rengini belirleyen temel değişken, yüzey sıcaklığıdır. Bunlar da sıcak oldukları için, ışık şiddeti görünür tayfın tüm dalga boylarında yüksek oluyor, böylece gözümüze beyaz görünüyorlar. Ancak, ışık şiddeti yüksek demek, ışıma gücü yüksek demek değil. Çünkü ışık şiddeti, birim yüzeyden gelen güç ve bunlar cüce olduklarından; yüzölçümleri, dolayısıyla toplam ışıma güçleri düşük. Sonuçta en yakın beyaz cüceler bile ancak teleskoplarla gözlemlenebiliyor.

Elektron Fermi basıncı devreye girmeden, sıcaklık helyum çekirdeklerini kaynaştıracak düzeye gelirse, yeni bir tepkime başlıyor ve hem bu çok enerji veren bir tepkime, hem de bunun verdiği sıcaklıkla yıldızın çekirdeğinin etrafında da hidrojen kaynaşması tekrar başlıyor. Bu durumda da termodinamik basınç artıp yıldızı şişiriyor ve yıldız, ana koldayken olduğundan çok büyük bir hale geliyor. Ancak bu büyüyen güç, daha da büyüyen yüzeye dağıldığı için, yıldızın yüzey sıcaklığı ana koldayken olduğundan düşük olup, bu yüzden rengi kırmızı görünüyor. Bu aşamadaki yıldızlara—

- *"Kızıl dev" mi deniyor?*

- Evet, öyle... Yıldızın çekirdeğindeki helyum, dolayısıyla helyum kaynaşma tepkimesi bittiğinde, tekrar çökme başlıyor ve aynı ikilem tekrar söz konusu: Elektron Fermi basıncı devreye girmeden önce sıcaklık yeni bir çekirdek kaynaşma tepkimesi başlatacak düzeye gelecek mi? Gelmezse, beyaz cüce oluşuyor; yeni tepkime başlarsa, kısa bir aradan sonra kızıl dev evresi devam ediyor. Bu tepkimenin bitmesiyle de yine aynı şey...

- *Birincisi, anlaşılan tüm beyaz cüceler aynı özelliklere sahip değil. İkincisi, bu nereye kadar devam edebilir?*

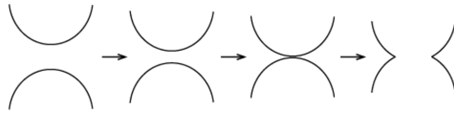
- İkinciden başlayalım. Bu, en fazla demire kadar devam edebilir. Çünkü çekirdek fiziği bize söylüyor ki, demirden büyük bir çekirdeği oluşturan bir kaynaşma tepkimesi, enerji üretmez, enerji ister; dolayısıyla kendiliğinden meydana gelmez. Yani kızıl dev evresi, en geç demir çekirdekleri üretimiyle son bulacaktır. İlk soruna gelirsek,

her ne kadar tüm beyaz cüceler, çekirdek tepkimelerinin bitiminden sonra başlayan çökmenin elektron Fermi basıncı ile dengelendiği cisimler ise de, tepkimelerin hangi aşamada bittiği, dolayısıyla beyaz cüceyi oluşturan plazmada hangi çekirdeklerin bulunduğu konusunda farklı olabilirler. Örneğin, bizim Güneşimiz bir karbon/oksijen beyaz cücesi olacak.

Ayrıca, beyaz cücelerin ilginç bir özelliği var: Kütlesi ne kadar yüksekse, yarıçapları da o kadar küçük oluyor—

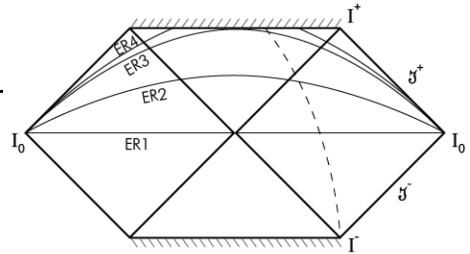
\- *Öyleyse, yeterince yüksek kütleli bir beyaz cüce, kara delik oluşturmak için gerekli şartı sağlayabilir...*

\- Evet, o yöne doğru gidiyoruz... Ancak, daha önce beyaz cücelik imkânsızlaşıyor: Kütle yaklaşık 1,4 güneş kütlesi olursa, elektronların momentumları o kadar yüksek oluyor ki, artık enerjileri için klasik değil, özel görelilik formüllerini kullanmak gerekiyor (ancak hâlâ genel göreliliğe gerek yok); bu durumda da enerji artık momentum



Şekil 56. Tamamlanmış Schwarzschild uzay-zamanının Penrose diyagramı içinde Einstein-Rosen köprüsünün evrimi (yataya yakın, ER ile işaretlenmiş eğriler) ve çöken bir yıldızın yüzeyinin hareketi (kesikli eğri).

Şekil 57. Gömme diyagramlarının kesitleri cinsinden Einstein-Rosen köprüsünün evrimi. Şekil 56'daki ER1, ER2, ER3 ve ER4 ile karşılaştırın.



ile o kadar hızlı artmıyor.[90] Şimdi bir an için dengedeki böyle (yüksek kütleli) bir beyaz cücenin hafifçe çöktüğünü düşünelim. Çökme ile potansiyelden kazanılan enerjinin yarattığı Fermi basınç artışı, "çekim"deki artışı artık karşılayamaz, dolayısıyla elektron Fermi basıncı çökmeyi durduramaz. Bu limiti Chandrasekhar adlı genç bir Hintli astrofizikçi, doktora sonrası araştırma için gemiyle İngiltere'ye giderken buldu. 1930'larda kıtalararası uçak yolculukları yoktu ve Hindistan-İngiltere yolu gemi

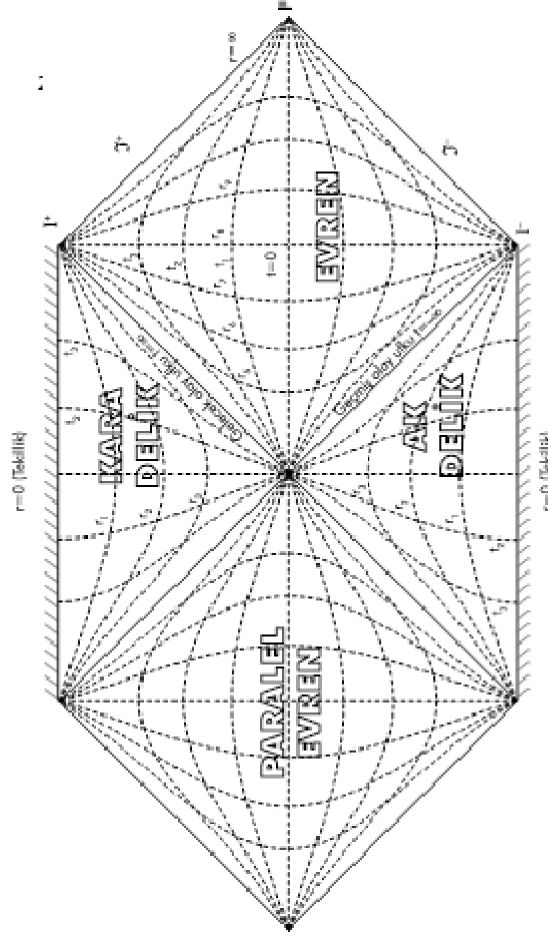
ile aylarca sürüyordu. Chandrasekhar, yıllar sonra bu keşfiyle Nobel aldı.

90)Meraklısına: Klasik kinetik enerji formülü, -. Özel görelilikteki enerji formülü ise -, yani büyük *p* değerleri için *pc*'ye benzemeye başlıyor.

- *Peki, beyaz cüce olamayacak kadar yüksek kütleli bir yıldız çekirdeği ne olur?*

- Çökmeye devam eder. Artan sıcaklıkta oluşan şiddetli çarpışmalar, atom çekirdeklerini parçalar ve elektronlarla protonlar birleşip $e + p \rightarrow n + \nu$ tepkimesiyle nötron yapacak kadar enerji verir.[91] Bu çökmeyi iki bakımdan hızlandırır: Tepkime, hem Fermi basıncı yapacak elektron sayısını azaltır, hem de nötrinolar maddeyle neredeyse etkileşmedikleri için yıldızdan kolayca kaçarlar; onların taşıdıkları enerji de gidince, yıldızın enerjisi iyice azalır. Sonunda yıldızın neredeyse tüm kütlesi nötronlara dönüşür—

91)Nötron kütlesi, elektron ve proton kütlelerinin toplamından büyük olduğu için normalde bunun tersi, yani $n \rightarrow e + p +$ - tepkimesi olur ve beta bozunumu diye adlandırılır. (Burada ν ve -, nötrino ve antinötrinoyu gösteriyor.)



- Nötron yıldızı!..

- Henüz belli değil... Yıldızın çekirdeğinin çökmesi devam etmektedir. Artan nötron yoğunluğu ile nötron Fermi basıncı devreye girer ve çökmeyi durdurup, "geri teper." Ancak bu durdurma ve geri tepmenin ayrıntılarını iyi bilemiyoruz; çünkü bu yoğunlukta nötronlar "güçlü kuvvet" ile de etkileşirler ve bu konuda bilgimiz yetersiz. Her durumda, yıldız çekirdeğinin çökmesi çok çabuk oluyor -yaklaşık bir saniyede- ve çökme hızları ışık hızının üçte birine yaklaşabiliyor. Ancak yıldızın çekirdeğine dahil olmayan kısımlarında "çekim" o kadar kuvvetli olmadığı için, o kısımlar merkeze düşmede geç kalıyor ve çekirdeğin üstüne düştüğünde, yıldızın çekirdeği geri tepmekte oluyor. Sonuçta güneş kütlesi mertebesinde iki kütlenin, ışık hızının hatırı sayılır kesirleri ile çarpışması söz konusu. Tabii ki korkunç miktarda kinetik enerji, ısı olarak açığa çıkıyor. Büyük miktarda

enerjinin, sınırlı bir hacimde çok kısa bir sürede açığa çıkmasına ne denir?

- *Hımm... bilemedim...*

- Patlama!.. Patlamanın tanımı budur! Bu olaya da **süpernova patlaması** denir[92] ve bir süpernovanın ışıma gücü, birkaç hafta, hatta ay süresince bir gökadayı geçebilir! Patlama anlarında, enerji üreten olsun, gerektiren olsun, olabilecek tüm çekirdek tepkimeleri meydana gelir[93]; demir ötesi birçok element (bakır, altın, kurşun, uranyum, vb.) ancak bu sırada oluşur. Patlamanın sonucu olarak yıldızın üst tabakalarının önemli bir kısmı uzaya saçılır; gerek kızıl dev evresinde oluşmuş daha hafif elementler, gerekse patlama esnasında oluşmuş ağır elementler de içererek. Hatta bor ötesi elementlerin evrenimizde oluşmasının tek yolu bu iki süreçtir. (Helyum, lityum, berilyum ve bor, Büyük Patlama'yı izleyen dakikalarda oluşabiliyorlardı, bkz. Soru 43.) Böylece yıldızlararası ortam "metal"lerce[94] zenginleşir ve her oluşan yeni yıldız (ve varsa gezegen sistemi) bir öncekinden daha yüksek oranda "metal" bulundurur—

92)Bunlar II. tip süpernovalardır. Bir de I. tipler vardır ki, gözlemsel olarak benzemekle beraber, fiziksel olarak farklıdır; onları daha sonra kozmolojik uzaklıkların ölçülmesi bağlamında konuşacağız.

93)Enerji üreten: egzoterm; enerji gerektiren: endoterm. Her türlü tepkime meydana geliyor, çünkü ortalıkta o kadar enerji var ki, aradaki fark kalkıyor; hani bir köye gökten para yağsa, o köy için zengin-fakir ayrımının kalkacağı gibi.

94)Astronomlar -kendi aralarında- hidrojen ve helyum dışındaki tüm elementlere "metal" der!

- *Zaten gezegenler hidrojen ve helyum dışındaki maddelerden oluştuğuna göre, ilk nesil yıldızların gezegen sistemleri olamazdı demek ki... Ayrıca, benim vücudumdaki karbon, oksijen, azot*[95] *vb. atomlarının çekirdekleri, artık var olmayan bir yıldızın içinde mi oluştular yani?..*

95)"Nitrojen" değil!!!

- Evet, hatta tüm atomlar aynı yıldızdan gelmemiş bile olabilir. Ayrıca, şu kolundaki künyenin atomlarının çekirdekleri de, bir ya da daha fazla yıldızın patlama anında oluşmuşlardır.

- *Yani, "yıldız tozundan yapılmışız", ya da "yıldızların çocuklarıyız"... Kendimi çok "new age" hissettim birden...*

- İnsan kendini birdenbire evren ile çok daha bağlantılı hissediyor, değil mi?...

- *Şu hissin keyfini çıkarayım biraz ...*

- *Peki süpernovadan sonra?*

- Üstten düşen katmanların uzaya saçılmayan kısmı yıldızın çekirdeğine katılır ve tabii bu, "çekim"i kuvvetlendirir. Şimdi soru, nötron Fermi basıncının çökmeyi durdurup durduramayacağıdır. Elektron Fermi basıncı gibi, belli bir kütlenin altında bu sorunun cevabı olumlu, üzerinde olumsuzdur. Ancak, süpernova öncesindeki geri tepmedeki belirsizlik ile aynı sebepten, tam sınır değeri bilemiyoruz. Ayrıca çökme yıldızın dönüşünü de çok hızlandırmıştır - kol ve bacaklarını toplayınca, dönüşü hızlanan bir patenci gibi, ama milyonlarca kat- ve bu dönüşün miktarı da bir olaydan diğerine farklı sınırların geçerli olmasına sebep olabilir. Sonuçta, çökme durursa oluşan şey, bir nötron yıldızıdır. Bunun ise kütlesi Güneş'ten büyük, yarıçapı 10 km civarında... Dolayısıyla bir kesmeşeker kadarının kütlesi **bir milyar ton**!

- *Bunun yüzeyindeki çekim kuvvetini düşünmek bile istemem... Peki ya Chandrasekhar limiti üstünde elektron Fermi basıncı gibi, burada da nötron Fermi basıncı çökmeyi durduramazsa?*

- Durdurabilecek, bildiğimiz başka bir şey yok...

- *Yani sonunda kara delik mi?*

- Evet... Güneş'in Schwarzschild yarıçapının 3 km olduğunu hatırlarsan, zaten bir nötron yıldızının yarıçapı bile kendi Schwarzschild yarıçapının ancak birkaç katı... Yani gidilecek çok yol kalmamış...

- *Kara delik oluşumunun bildiğimiz tek yolu bu mu?*

- Bizim şu anki evrenimizde doğal yollarla, evet. Tabii ki bizden çok ileri bir teknolojiye sahip bir uygarlık, örneğin bir göktaşını kendi Schwarzschild yarıçapına sıkıştırmanın yolunu belki de bulabilir...

Ancak, yıldızların yoğun olduğu bölgelerde, yıldız çökmesi ile oluşan kara deliklerin, birbirleri ile ya da etraftaki yıldızlar ile çarpışma olasılıkları da yüksektir. Böyle çarpışmalar, iki kara deliğin birleşmesi ya da kara deliğin yıldızın kütlesinin en azından bir kısmını yutması ile sonuçlanır, bu da daha büyük kara deliklerin oluşumu demektir. Zaten yıldız çarpışma olasılıkları da yüksek

olduğundan ve bunlar da daha büyük yıldızlar oluşturup, yıldızı hem zamanda hem olasılık olarak kara delik olmaya yaklaştırdığından, kara delik oluşumu da ortalamadan daha sık olur. Sonuçta, sarmal gökadaların merkezlerinde dev kara deliklerin oluşması çok şaşırtıcı değil; bunlar milyonlarca güneş kütlesine ulaşabiliyorlar.

Aslında, kara delik oluşumu için yıldız çökmesinden başka "bildiğimiz" bir yol daha var, ama bu ancak çok erken "ilksel"[96] evrende mümkün olabilir. Şöyle ki, ilksel evrende yoğunluk çok yüksek olduğu için, yoğunluk dağılımındaki kuantum dalgalanmaları sonucu, evrenin bazı yerlerinde ortalamadan sapmanın karşılık geldiği kütleler, kendi Schwarzschild yarıçapından daha küçük bir bölgede bulunabilir. Bu bölgeler de çöküp kara deliğe dönüşmek zorundadır. Böyle oluştuğu varsayılan kara deliklere "ilksel kara delikler" deniyor. Bu olasılığı 1966'da Zeldovich ile Novikov ve 1971'de Hawking ortaya attılar.[97]

96)İngilizce: Primordial.

97)Sanırım Sovyet bilimsel dergileri Batı'da okunamadığından, Hawking'in önceki çalışmadan haberi yoktu.

Ancak, bir sorun vardı: Bu ilksel kara delikler, madde yutarak büyümeliydi. Basit bir hesap, böyle bir kara deliğin Schwarzschild yarıçapının bugün kozmolojik ölçeğe ulaşmış olması gerektiğini gösteriyordu. Tabii ki bugün böyle bir şey gözlemlemiyoruz; durum böyle olsaydı, ya biz kara deliğin içinde olurduk, ya da evreni eşyönlü/izotropik olarak gözlemlemezdik...

- *Nasıl çözüldü bu sorun?*

- Bunu biraz daha sonra konuşalım, olur mu?

46-Kara delik her şeyi yutar mı? Gözlemlenebilir mi?

- *Kara delik, etrafındaki her şeyi, dev bir elektrik süpürgesi gibi içine çekip yutan bir canavar mıdır?*

- Hem evet, hem hayır... Bir kara deliğin merkeze belli mesafedeki "çekim"i, aynı kütledeki bir yıldızdan farklı değildir. Fark, olası

mesafelerdedir. Örneğin, Güneş'in üç katı kütleye sahip bir yıldızın yarıçapının bir milyon km civarında olması beklenir. Böyle bir yıldızın yüzeyinde, çekimin 400 m/s^2 kadar (dünyanın 40 katı) olduğunu bulabiliriz. **Aynı kütleli bir kara deliğin aynı mesafedeki çekimi de aynı olacaktır**. Ancak, yıldızın merkezine bir milyon kilometreden fazla yaklaşamazsınız (ya da yaklaşırsanız, yıldızın içinde olursunuz; çekim alanının ya da ivmesinin ifadesi değişir); ama kara deliğe Schwarzschild yarıçapı kadar yaklaşabilirsiniz -ki bu kara delik için 10 km civarındadır. Bu mesafede Newton ifadesi bile 4×10^{12} m/s^2 veriyor.

- *Yani bir kara deliğin etrafında bir gezegenin dolaşması mümkün mü?*

- Gezegen yörüngeleri açısından, az önce belirttiğim gibi, aynı kütleli bir yıldız ile arada fark olmaz. Ancak, tabii gezegen -eğer sistem temiz ise- ışık almayacağından, soğuk ve karanlık bir yer olur; dolayısıyla bildiğimiz tür hayat barındıramaz.

- *Sistemin temiz olması ne demek? Temiz olmaz ise ne olur?*

- Sistemde gezegenler ya da göktaşları gibi, bu hesaplarda noktasal kabul edilebilecek, (neredeyse) kapalı yörüngede hareket eden cisimlerden başka bir şey olmaması demek. Yani kara deliğin bir şeyler yutuyor olmaması.

Örneğin, sistemde şu veya bu sebeple gaz varsa, gaz molekülleri birbirleriyle etkileşip yavaş yavaş enerji ve açısal momentum kaybedebilirler. Bir gaz bulutu, dönen bir kara delik etrafında bir disk oluşturup, azar azar yutulur. (Açısal momentum yüzünden çabuk yutulmuyor.) Tabii ki olay ufkunun özelliği gereği, içeri giren bir daha çıkamaz; ister gaz molekülü olsun, ister uzay gemisi, ister göktaşı.

Kara delik bir gaz bulutunu yutmakta ise, buluta göre kara delik çok küçük olduğundan, kara deliğe girerken gaz sıkışır ve ısınır. Isınınca da ışınım yayar—

- *Yani kara delik görünür hale mi gelir?*

- Evet, yıldız mertebesinde kütleli kara delikleri gözlemlemenin başlıca yolu budur. Ama ışınımın önemli bir kısmı X ışınları olarak çıkar. Tabii bu durumun olası bir gezegen için ne kadar hayırlı olacağını düşünebilirsin...

- *Eh, başka türlü siyah uzay fonu önünde kara deliği görmek zor herhalde... Peki kara deliklerin gerçekten gezegeni olabilir mi?*

- Kara deliğe dönüşen yıldızın gezegenleri var ise, bırak süpernova patlamasını, kızıl dev evresinin bile bunları olumsuz etkilemesi kaçınılmazdır. Bizim Güneş bile kızıl dev olduğunda Merkür ve Venüs'ü yutacak; dünyayı yutmasa bile sıcaklığını en az yüzlerce derece arttıracak. Bir süpernova patlamasının ise, bizimkine benzer bir gezegen sistemine ne yapacağını kestirmek zor. Büyük olasılıkla iç gezegenler buharlaşır, uzaktaki gaz devlerinin de[98] gaz kısmı süpürülüp, merkezdeki katı kısmı geride kalır.

98)Uzaktaki gezegenlerin gaz devleri olacağını varsayıyoruz, ama aslında başka yıldızların gezegen sistemleri konusunda çok şey bilmiyoruz.

- *Diğer tip kara delikler nasıl gözlemlenebilir?*

- Bir gökcisminin kütlesini, etrafındaki yörüngelerdeki cisimlerin hareketine bakarak belirleyebiliriz.[99] Bu yöntemle gökadamız Samanyolu'nun merkezinde yaklaşık dört milyon güneş kütleli bir cisim olduğu saptanmıştır. Ölçülen en küçük yörünge, aynı zamanda bize cismin büyüklüğünün en fazla Plüton yörüngesi kadar olduğunu söylüyor. Bu boyuta bu kütleyi sığdıracak kara delikten başka bir cisim bilmiyoruz, genel görelilik ve parçacık fiziği standart modeli çerçevesinde. Hatta bu, bu kuramların genelde makul kabul edilen genelleştirmeleri için de geçerlidir. Başka bazı ipuçları da göz önüne alınınca, Samanyolu'nun merkezindeki yaklaşık 4 milyon güneş kütleli kara delik, ilgili bilimcilerin büyük çoğunluğu tarafından varlığı ispatlanmış kabul edilen ilk kara deliktir.

99)Newton fiziği çerçevesinde, dairesel yörünge için, *G* Newton sabiti, *M* merkezdeki, *m* yörüngedeki kütle, *v* ve *r* hız ve yarıçap olmak üzere, - yazabilir; dolayısıyla *v* ve *r*'yi ölçerek *M*'i bulabiliriz. Dairesel olmayan yörüngeler için hesap biraz daha karışıktır, ama aynı şey geçerlidir. Genel görelilikte denklemler biraz değişir, ama metindeki cümle hâlâ doğrudur.

Benzer şekilde tüm sarmal gökadaların merkezinde de böyle **süper yüksek kütleli**[100] kara delikler olduğu düşünülmektedir. Aktif gökada çekirdekleri[101] (AGN) denen, merkezinde yüz binlerce, hatta birkaç milyon ışık yılı uzunlukta gaz fışkırmaları gibi çok enerjik olayların olduğu gökadalarda, bu enerjinin merkezdeki süper yüksek kütleli kara deliğin etrafındaki yıldızları ya da yoğun toz bulutlarını yutmakta olması sonucu açığa çıktığı; yakın çevrede yutacak

malzeme kalmayınca, bunların sıradan sarmal gökadalar haline geldikleri, **kuasar**ların da AGN’lerin milyarlarca yıl önceki halleri olduğu düşünülmektedir.
100)İngilizce: Supermassive.
101)İngilizce: Active galactic nuclei.

İlksel kara delikleri ise, doğrudan, hatta az dolaylı bir gözlemleme yolu bilmiyoruz. Ancak, çeşitli olası kozmolojik ya da astrofiziksel etkileri tartışılmaktadır.

47-Kara delik başka evrenlere ya da evrenin uzak köşelerine geçit olabilir mi?

- *Bir yerlerde kara deliklerin başka evrenlere ya da evrenin uzak köşelerine geçit olabileceğini okumuştum; aslı var mı?*

- Hem evet, hem hayır... Bilimkurgu kitaplarına ya da filmlerine de konu olan bu olguyu konuşmak için, iki ileri kavramı anlamamız gerekiyor: Schwarzschild çözümünün “tamamlanmış” halini ve Penrose diyagramlarını...

- *Konuşalım... Gerekirse geri dönüp, üstünde tekrar düşünürüm.*

- Peki o zaman... Dikkatli incelersek, Schwarzschild koordinatlarının, çözüm uzay-zamanını iki kez kapsadığını, bir başka deyişle yarısını kapsadığını görüyoruz...

- *Nasıl yani?*

- Bildiğimiz iki boyutlu $x–y$ düzlemini düşün. Şimdi $z = y^2$ tanımla. $x–z$ düzlemindeki her nokta, $x–y$ düzlemindeki iki noktaya karşılık gelir. Sen eğer baştan $x–z$ düzlemini (tabii ki yalnızca $z \geq 0$ olmak üzere) biliyorsan, gerçek uzayın yarısını biliyorsun demektir.

- *Bu biraz hile gibi geldi bana... Görmenin bir fiziksel yolu yok mu?*

- Var. Genel görelilik, zamanda simetrik bir kuramdır. (Yani $t \rightarrow –t$ dönüşümü yaparsan bir şey değişmez, Newton mekaniği / genelçekim kuramı da böyleydi.) Bunun fiziksel anlamı, cisimlerin yörüngelerini geçmişe doğru da geleceğe doğru hesapladığın şekilde hesaplayabilmen demek. Elinden bıraktığın, yere düşen bir taşı

düşün. Bunun hareketi, yerden atılıp, tam senin taşını bıraktığın an ve yükseklikte maksimum yüksekliğine ulaşan başka bir taşla tamamen aynıdır. Aradaki fark şudur: Senin taşının geçmişi yapaydır, negatif zamanlarda bir dış öğe (sen) tarafından belli bir yükseklikte sabit tutulmuştur; diğer taşın geçmişi doğaldır, yani geleceğine matematiksel olarak düzgün bir şekilde bağlanır. Hatta sen bıraktığın taşın yere vuruş zamanını hesaplamak istesen, bir de negatif çözüm bulursun; bu diğer taşın yerden fırlatılış zamanına karşılık gelir. Dolayısıyla sen, elinden bıraktığın taşa bir geçmiş icat edebilir ve benim taşımın hareketi gerçek bir taşın hareketinin ikinci yarısıdır diyebilirsin. Bu tür eklemelere **analitik devam**[102] deniyor.

102) İngilizce: Analytic continuiation.

Şimdi aynı şeyi kara delik uzay-zamanında düşün. Yani bir noktadan sıfır hızla bırakılıp, kara deliğe düşen bir cismi. Bu da **o anda maksimum yüksekliğe ulaşmış bir cisim olabilirdi**. Böyle bir cismi geçmişe doğru takip ettiğinde de, olay ufku ve tekilliğe varırsın. Yani cisim tekillikten fırlamış, olay ufkundan çıkmış, bir noktada durup, tekrar olay ufkundan içeri girip tekilliğe çarpmıştır.

- *Hani olay ufku yalnızca bir yönde geçilebiliyordu?*

- Demek ki o sözü biraz daha dikkatli söylemek gerekliymiş: “Olay ufkuna *t*’si artıp, *r*’si azalarak varan cismin *r*’si azalmaya devam etmek zorundadır.” İfade, olay ufkuna *r*’si artarak varan cisimleri (varsa) kapsayamaz; bunu zaman işaret simetrisini düşünerek bulduk. Birazdan zaten her şeyi daha iyi anlayacağız.

Şimdi *r*–*t* uzay–zamanında bir noktayı düşün. Yani *r* koordinatındaki bir nokta, herhangi bir *t* zamanı. O noktadan o anda geçecek yukarıdaki tür bir cismin $t = 0$ anında hangi $r = R$ koordinatından sıfır hızla bırakılmış olması gerektiğini hesaplayabiliriz. Cisim bir saat olsun ve bırakıldığı anda sıfırlanmış olsun, noktamızdan geçerken gösterdiği zamana da τ diyelim. (Cismin özzamanı.) İşin güzel tarafı şu: Her *r*–*t* çiftine farklı bir *R*–τ çifti karşılık gelecektir. Şunu kolayca görebilirsin: *R*’leri aynı olan iki farklı *r*–*t* noktasının τ’ları farklı olacaktır. Öyleyse **r ve t yerine R ve τ’yu koordinatlar olarak kullanabiliriz.** Nasıl olsa genel görelilikte istediğimiz koordinat sistemini kullanmakta özgürüz...

Bu koordinatlarda açıkça görülüyor ki, bir değil, iki tekillik var; biri geçmişte, biri gelecekte. Bir değil, iki olay ufku var, biri geçmişte, biri gelecekte. Geçmişteki olay ufkundan yalnızca dışarı çıkılabiliyor, gelecekteki olay ufkundan yalnızca içeri girilebiliyor. Yani olay ufkunun yalnızca bir yönde geçilebilme özelliği ile zamanda simetri, iki olay ufku olması sayesinde, çelişmiyorlar. Gelecekteki olay ufkunun sınırladığı bölgeye şimdi kara delik diyoruz, geçmiştekinin sınırladığı bölgeye ise (kara deliğin yutma özelliği yerine onun çıkarma özelliği olduğu için), **ak delik...**

Yukardaki tür bir parçacığın yörüngesi ayrıntılı şekilde incelenince, ak delik bölgesindeki herhangi bir noktanın *r–t* değerlerini taşıyan bir nokta da kara delik bölgesinde bulunabiliyor. (Ama tabii *R*–τ değerleri farklı.) Demek ki, $r < r_S$ bölgesini Schwarzschild, yani *r–t* koordinatları iki kez dolaşıyormuş; ikiye katlanmış bir kâğıdın üzerine kâğıdı tam zannederek bir koordinat sistemi uygulamak gibi... Biz merkezden yükselip düşen cisimleri düşünerek bir anlamda kâğıdın katını açmış olduk...

- *$r > r_S$ bölgesi için de bu kat açma işlemi mümkün mü?*

- Yalnızca mümkün değil, artık zorunlu. Diğer kat açma işleminden sonra bu artık matematiksel olarak açıkça görünüyor. Neden zorunlu olduğunu birazdan Penrose diyagramını konuşunca anlayacaksın.

Ancak, önce bu kat açmanın ne anlama geldiğini konuşalım: Bu, bizim bildiğimiz $r > r_S$ bölgesine eşdeğer başka bir bölge, yani **ikinci bir evren**! İşte sorduğun “geçit”in bilimsel literatürdeki ilk versiyonu, **bu** evrene bir geçittir ve Einstein-Rosen köprüsü denir.

- *Yani bir yıldızın çöküşü başka bir evrene kapı mı açıyor?*

- İlk anda öyle gibi gözüküyorsa da, hayır. Buradan sonrası için artık Penrose diyagramlarını konuşmamız lazım:

Penrose diyagramı, bir uzay-zamanın bir uzay × zaman kesitinin bir kâğıt üzerinde özel bir temsili, yani bir tür haritasıdır. Onu özel yapan şeyler, uzay-zaman sonsuz da olsa -ki genellikle öyledir- diyagramın sonlu olması, ve ışık hareket yönlerinin düşeyden 45° açı yapan doğrular olmasıdır. Bu arada, gelecek yönü, diyagramda yukarı olacak şekilde seçilir.

- *Sonsuz bir bölgeyi sonlu bir bölge ile noktalar bire bir eşleşecek şekilde nasıl ilişkilendirebilirsiniz ki?*

- Bu hiç problem değil. Örneğin, *x*, 1 ile sonsuz aralığında olsun, $y = 1/x$ tanımla. Şimdi *y*, 0-1 aralığında, ama yine de her *x* için farklı bir *y* var... Sonsuzluk bazen şaşırtıcı olabiliyor.

Diğer özelliğin ise şöyle bir güzelliği var: Kütleli tüm cisimler Penrose diyagramında yaklaşık olarak yukarı doğru hareket ederler; yani düşeyden 45°'den fazla sapamazlar. Dolayısıyla Penrose diyagramı, neden-sonuç ilişkilerinin olabilirliğini çok net bir şekilde görsel olarak gösterir. Şöyle ki, **iki noktayı bağlayan çizgi düşeye yakınsa, aralık zamansaldır; yani bu iki noktanın temsil ettiği olayların arasında sebep-sonuç ilişkisi olabilir.** Tabii ki bu çizgi yataya yakınsa aralık uzaysaldır ve bu iki noktanın temsil ettiği olayların arasında sebep-sonuç ilişkisi olamaz.

Şekil 54'te Schwarzschild uzay-zamanının Penrose diyagramını görüyorsun. $0, r_1, r_2, r_3...$ ve $0, t_1, t_2, t_3...$ sıfırdan başlayıp artan *r* ve *t* değerlerini göstermektedir. Bu diyagramda sağdaki baklava, bizim evrenimizi ($r > r_S$ bölgesi) ve üstteki üçgen ise kara deliği ($r < r_S$ bölgesi) temsil etmektedir. Olay ufkunun aynı zamanda *t*'nin sonsuza gittiği bir yer olduğuna, sonra (yani yukarıda) *t*'nin tekrar düştüğüne dikkat et.

Yükselip düşen cisimleri düşünmek bize ak delik bölgesinin var olması gerektiğini gösteriyor, bunun sınırı olan geçmiş olay ufku, bizim evrenimizi (iki boyutta; yani burada gösterilmeyen iki de açısal boyut var, ama onlar bu diyagramın her noktası için aynı) sınırlayan çizgilerden biri. Bir diğer sınırı tabii gelecek olay ufku. Diğer sınır çizgi ve noktalarının da isimleri var: Örneğin I^0, *t*'nin sonlu, *r*'nin sonsuz olduğu tüm noktaları temsil ediyor ve adına **uzaysal sonsuzluk**[103] deniyor. Sağ üstteki sınır çizgisi, I^+ ise hem *t*'nin, hem *r*'nin sonsuz olup, *ct–r* farkının sonlu olduğu noktalara karşılık geliyor ve **gelecek ışıksal sonsuzluk**[104] deniyor. I^+ ise, *r*'nin sonlu, *t*'nin (+) sonsuz olduğu tüm noktaları temsil ediyor ve **gelecek zamansal sonsuzluk**[105] olarak nitelendiriliyor. Genelde bir dış

evren, bir Penrose diyagramında böyle görünür; dış kısmı birer I$^+$, I$^+$, I^0, I$^-$ ve I^- ile sınırlanır, iç kısmı diyagramdan diyagrama fark eder.
103)İngilizce: Spacelike infinity.
104)İngilizce: Future lightlike infinity.
105)İngilizce: Future timelike infinity.

Ak delik bölgesinin varlığını nasıl anladığımızı konuşmuştuk. Diyagrama bakınca apaçık görünüyor ki, bu bölge var ise, paralel evren de olmalı. Ak delik bölgesinden sola doğru giden cisimler nereye varacak yoksa?

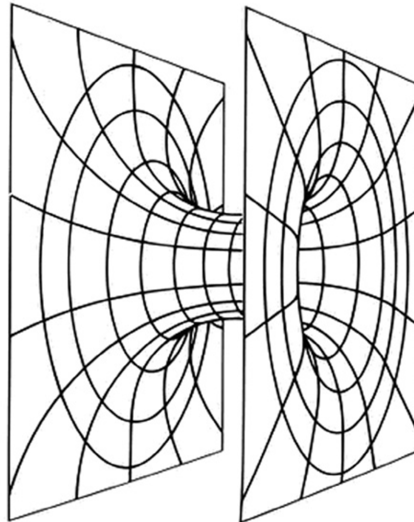
- *Ben hâlâ yıldız çöküşü ile paralel evren arasındaki ilişkide kaldım. Çöküş paralel evreni yaratmıyor değil mi? O kadar da olmaz herhalde...*

- Tamam, geliyoruz... Önce Einstein-Rosen köprüsünü Penrose diyagramı cinsinden bir anlayalım: Bu köprü, bir I^0'dan diğerine giden bir *t = 0* kesitidir.

- *Bu neden bir köprü oluyor ki?*

- Görmek için, bu kesite bir de φ açısı ekleyip, iki boyutlu bir yüzey elde edelim, sonra da bunu üç boyuta gömelim, Şekil 55'e bakabilirsin:

- *Neden bunun Penrose diyagramını yapmadık?*



Şekil 55. Einstein-Rosen köprüsü. Şekil 54’deki Penrose diyagramının $t = 0$ kesitinin bir açı boyutu eklenip üç boyuta gömülmüş hali.
Sağ taraf bizim evrenimizi, sol taraf paralel evreni göstermektedir. r’nin en küçük r_S’e kadar düşüp, sonra arttığı, Penrose diyagramı incelenerek görülebilir. Bir r ve φ değer çiftine sahip bir değil iki noktanın bulunması, bu yapıyı bir köprü yapar.

- Çünkü bu bir uzay × uzay kesiti. Penrose diyagramları uzay × zaman kesitleri için yapılır.

Her neyse, sağ taraf bizim evrenimizi, sol taraf paralel evreni gösteriyor. Böyle olduğunu ve bu yapının bir köprü olduğunu görmek için Penrose diyagramına bak. O kesit üzerindeki her nokta, Şekil 55’de bir çembere karşılık gelir (φ açısı ekledik ya); sağdan sola doğru geldikçe *r* küçülüyor, bu da gittikçe küçülen çemberler demek; her biri öncekinden küçük çemberleri iç içe koyarsan bir düzlem ya da belki Şekil 48’teki gibi bir yüzey elde ederdik. Ancak, **Penrose diyagramının orta noktasında, *r* en küçük değerine, r_S’e ulaşıyor, sola devam edince tekrar artmaya başlıyor!** Yani daha küçük çemberler koyup düzlemi/yüzeyi tamamlayamıyoruz, ortada bir delik kalıyor... Tabii ki artan *r* değerleri paralel evrene ait...

- Ama bu kesitin bir anlamı yok ki! Bu uzaysal bir kesit ve ben uzaysal bir yolda ilerleyemem. Bir başka deyişle, Penrose diyagramında yaklaşık yukarı ilerlemem gerekiyor, yani Şekil 54’e göre hiçbir şekilde bizim evrenden paralel evrene geçemem!

- Harikasın. Ama Penrose diyagramları 1970’lerde geliştirildi, onlarsız da bunu fark etmek zaman aldı ve zor oldu. Senin bu dediğinin bir ifadesi de şu: Einstein-Rosen köprüsü statik değil, dinamik bir yapıdır ve biz geçemeden kopar. Bunu görmek için Şekil 56’daki Penrose diyagramına bak. Burada Einstein-Rosen köprüsüne ve zamanda ilerlemiş hallerine karşılık gelen kesitleri görüyorsun. Her yeni kesit, daha küçük bir *r* değerine ulaşıyor, yani “boğaz yarıçapı” gittikçe küçülüyor. Sonunda, bizim evrenimizin kesiti, diğer evreninkiyle birleşemeden tekilliğe varıyor, yani köprü kopmuş oluyor. Bu olay, “gömme diyagramları”nda ise, Şekil 57’deki gibi gösteriliyor. (Bunlar kesitin kesiti, yani φ açısı eklenmemiş.)

- Şekil 56’daki diyagramda neden ER2-ER3... yukarı doğru bombe yapıyorlar?

- Bunu sen düşün istersen; Şekil 54’e de bak... İki ucun neden I^0’larda kalmasının gerektiğini görmek, biraz daha kolay...

- *Peki, sonra düşünürüm... Ama sonuçta geçit yok... Öyle mi?*

- Varsa da, Einstein-Rosen köprüsü değil. Ama bu kavram, insanların hayal güçlerini ateşledi ve daha olası başka çözümler olabilir mi diye düşünmeye başladılar. Olası geçitlere de **kurtdeliği**[106] adı verildi. Sonuçta, Einstein-Rosen köprüsü tamamlanmış Schwarzschild çözümünün bir kesiti, bu çözüm de uzay-zamanı boş varsayarak bulunan bir çözüm. Acaba uzay-zaman uygun bir madde-enerji ile dolu olsa, kopmayacak bir geçit, bir kurtdeliği oluşabilir mi?

106)Bkz. Sayfa 136, 49. dipnot.

- *Oluşabilir mi?*

- Bilmiyoruz. Aslında genel görelilikte istediğin metrik ifadesini çözüm kabul edebilirsin[107], ama onunla birlikte Einstein denklemlerini sağlayacak madde doğada var mı? Kararlı (yani kopmayacak) kurtdelikleri, ancak negatif enerji yoğunluğu ile mümkün gibi görünüyor; maddenin bu tür özellikleri ise genel göreliliğin değil, parçacık fiziğinin ya da kuantum alan kuramlarının konusu... Bazı sınırlamalar var gibi görünüyor ama, durum belirsiz.

107)Çözüm derken, Einstein denklemlerinin çözümlerini kastediyoruz. Bu denklemde “sol” tarafı uzay-zaman geometrisinin, “sağ” tarafı madde-enerjinin özelliklerinin ve dağılımının belirlediğini hatırla. (Bkz. Soru 33.) Dolayısıyla, her geometri “çözüm” olabilir; yeter ki uygun madde-enerji özellikleri ve dağılımı bulunabilsin!

- *Çöken yıldız ve paralel evren...*

- Ah, evet... Şekil 56’ya tekrar bak. Çöken yıldızın yüzeyindeki bir parçacığın uzay-zamandaki yolunu düşün. Dış evrenden başlayıp, olay ufkunu geçip, sonunda tekilliğe ulaşır, değil mi? Yani Penrose diyagramında kesik çizgi ile gösterilene benzer bir yol takip eder. Dolayısıyla bu kesik çizgi, yıldızın içi ile dışını ayırır diyagramda.

Şimdi, yıldızın içi boşluk değildir, dolayısıyla orada, tamamlanmış olsun-olmasın, Schwarzschild çözümü geçerli değil! Orası için bir şekilde ayrı bir çözüm bulup, uygun bir şekilde Schwarzschild çözümün ilgili parçası ile birleştirmek gerek. Yani geçmiş olay ufku da, geçmiş tekillik de, diğer evren de yıldızın maddesi tarafından

örtüldü, yani çöken yıldız için geçerli değiller. Zaten yıldız çökmeden önce tekillik yoktu.

- *Eee, niye bu kadar kafa patlattık o zaman?*

- Tamamlanmış Schwarzschild uzay-zamanı, Einstein denklemlerinin geçerli bir boşluk çözümü, yani olması mümkün bir fiziksel durum. Ancak bu çözüm tekilliğin baştan beri var olduğu bir duruma karşılık geliyor, sonradan oluştuğu değil. Bu yüzden bu uzay-zaman bazen **ezeli-ebedi kara delik**[108] diye nitelendirilir.

108)İngilizce: Eternal black hole.

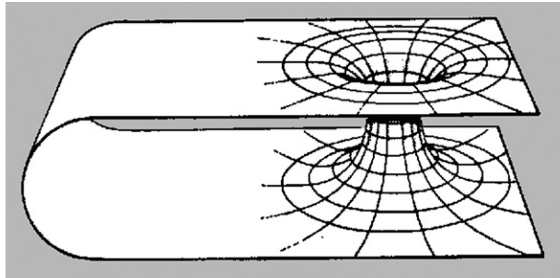
- *Evrende var mı böyle şeyler?*

- Belki de olabilir, ama varsa bile fazla büyük değildir herhalde. Büyük olması, evrenin homojenliğini bozardı. Kozmolojik ilke gerçi sadece bir varsayım olarak başladı, ama kozmik ardalan ışınımı gözlemleri de bunu bayağı destekliyor. Ayrıca bu çözümü incelemek, bize Einstein denklemlerinin basit bir çözümünde bile ne kadar zengin bir yapı bulunabileceğini gösteriyor, yani bir anlamda "antrenman maçı" yapabiliyoruz. Hani "beyin cimnastiği" demez miyiz? Ve tabii ki, bir fiziksel olayı analiz ediyorsak, elimizdeki duruma uygun kısmı, (örneğin çöken bir yıldız için Şekil 56'daki kesikli yolun sağında kalan bölgenin temsil ettiği uzay-zaman bölgesi) analizin bir kısmını veriyor.

- *O zaman, başka bir evrene geçit "Varsa vardır, yoksa yoktur ... Biz yapamayız" mı demek oluyor?*

- Kurtdelikleri için bunun tartışması sürüyor. Ama kara delikler bakımından söylenebilecek birkaç şey daha var...

Zaten kurtdeliği kavramının heyecan yaratmasının sebeplerinden biri, Einstein-Rosen köprüsünün iki evreni değil de, bizim evrenimizin iki uzak bölgesini bağlıyor olabileceği önerisiydi. (Bkz. Şekil 58.)



Şekil 58. Einstein-Rosen köprüsü iki evreni değil de, bizim evrenimizin iki uzak bölgesini bağlıyor olabilir.

Ayrıca, Schwarzschild çözümünden bahsederken, en basit kara delik çözümü olduğunu söyledik. Gerçekten de bir bakıma çok basit bir cisimdir Schwarzschild kara deliği: Yalnızca kütlesi ile betimlenebilir. Bir temel parçacık bile bu kadar basit değildir; kütlesinden başka yükü, "spin"i, baryon veya lepton sayıları olur.

- *Başka kara delik türleri var mı? Varsa, onlar ne kadar basit veya karmaşık?*

- Başka kara delik türleri var ve onlar da (bu bakımdan) fazla karmaşık değil. Tam doğru ifadesiyle: Einstein denklemlerinin sonsuzda düz uzay-zamana indirgenen, zamandan bağımsız, boşluk çözümü, iki parametre ile betimlenebilir. Boşluğa alternatif olarak, elektromanyetik alana da izin verirsek, parametreler üçe çıkar. Bu parametrelerin hangilerine sahip olduğuna göre kara deliklere verilen isimler, Tablo 6'da görülüyor. Tabii her kara deliğin kütlesi olmak zorunda.

		(Elektrik) Yük	
		Yok	Var
Açısal Momentum	Yok	Schwarzschild	Reissner-Nordström
	Var	Kerr	Kerr-Newman

Tablo 6. Kara delik çözümlerinin isimleri. Bir kara deliğin kütlesine ek olarak yükü ve/veya açısal momentumu olabilir.

Çöken bir yıldızın çok karmaşık bir yapısı olabilir, kimyasal bileşimi, şekli (küreye göre deformasyonları) vb. Ama çöküş sürecindeki şiddetli etkileşim, tüm bu karmaşıklığı "ütüler", yıldızın tüm özelliklerinden geriye bu üçü kalır: Kütle, yük ve açısal momentum.

- *Bu kadar mı basit? Üç parametre?*

- Bu kadar basit. Bir kara delik, hâlâ bir temel parçacık kadar basit. Bu basitlik, yani yıldızın üçü hariç tüm özelliklerinin silinmesi, o kadar çarpıcı ki, bir adı var: "Saçsızlık teoremi."[109]

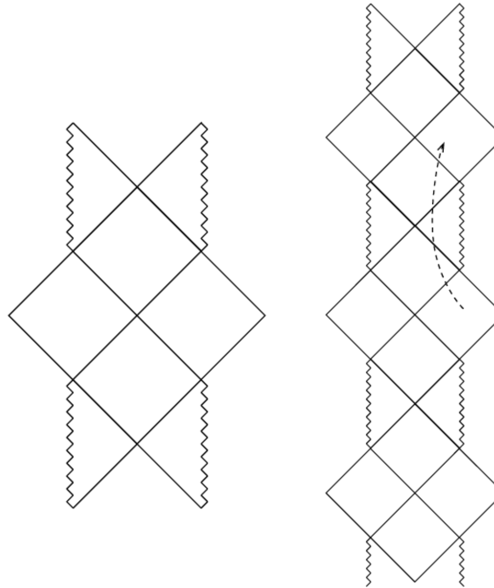
109)İngilizce: No-hair theorem.

- *Ne demek şimdi bu? Saç ile ne ilgisi var?*

- Burada espri, saçsızlığın basitlik olması. Yani bir sanatçının benim portremi çizmesi gerekse, üç-beş çizgide iş biter: basit.[110] Ama aynı kişi şarkıcı Bilgen Bengü'nün ya da eski futbolcu Valderrama'nın portresini yapmaya kalksa, en az yarım saat uğraşır.

110)Kapak içindeki fotoğrafıma bakın…

Her ne kadar (uzay-zamanın) basitliği açısından Schwarzschild kara deliği daha çok konuşulsa da, evrendeki kara deliklerin ezici çoğunluğunun Kerr tipi olmasını bekleriz, çünkü tüm yıldızların açısal momentumu vardır. (Örneğin bizim Güneşimiz, kendi ekseni etrafında yaklaşık 25 günde dönüyor.) Ancak, Soru 42'de de konuştuğumuz gibi, yıldızların net yükü olmasını beklemeyiz. Buna rağmen, küresel simetri onu daha basit yaptığı için, Reissner Nordström kara deliğinin Penrose diyagramına, Şekil 59'un sol tarafına bakalım. Dikkatini çeken bir şey var mı?



Şekil 59. Reissner-Nordström kara deliğinin Penrose diyagramı.

Şekil 59. Reissner-Nordström kara deliğinin Penrose diyagramı.

- *Yine ortada yan yana iki baklava görüyorum... Bunlar bizim evren ve bir paralel evren olsa gerek... Tekillikler Schwarzschild'de ikiydi, burada dört olmuş... Ve Schwarzschild'de yataydılar, burada dikeyler. Olay ufuklarının*

altında/üstünde iki çizgi daha var... Sanırım tekilliklerin dikey olması önemli, öyle mi?

- Tekilliklerin dikey olmasının sence anlamı ne olabilir?

- *Bakalım... Bizim evrenden yola çıkan bir cisim, olay ufkunu geçebilir... ama bir tekilliğe çarpmak zorunda değil! Aradan geçebilir! Geçebilir de, nereye?...*

- Diyagramın aşağısındaki tekillikler ile yukarısındaki tekilliklerin matematiksel yapıları tamamen aynı. Dolayısıyla, kuramsal olarak, **bizim evren ve paralelinin gelecek tekillikleri, bir başka evren çiftinin geçmiş tekillikleri olabilir**! Bu, Şekil 59'un sağında gösterildiği şekilde, sonsuza kadar yukarı ve aşağı devam edebilir.

- *Efendim? Sonsuza kadar mı?*

- Bir başka deyişle, Reissner-Nordström uzay-zamanına sonsuz kez analitik devam işlemi uygulanabilir...

- *Bu matematiksel işlemin evrenimizde fiziksel karşılığı var mı? Örneğin, Schwarzschild'de kara delik yıldız çökmesinden oluştuğu zaman, yoktu. Yıldız paralel evreni, geçmiş tekilliği filan kapatmıştı... Burada da aynı şey olmasın?*

- Yıldız yine paralel evreni ve geçmiş evrenleri kapatır. Ama gelecek evrenleri kapatmayabilir gibi görünüyor...

- *Yani?*

- Eğer kapatmazsa, ya da çözümü geçersiz yapacak başka bir neden yoksa (örneğin dış evrenden gelen -ardalan gibi- ışınımların olay ufku yakınlarında yoğunlaşarak bu boşluk çözümlerini geçersiz kılacağını düşünenler var), sağ şekildeki kesikli yolu izleyen bir cisim ya da kişi, bir evrenden başka bir evrene geçebilir!

- *Yaşasın! Sonunda bir geçit!*

- Belki... belki... Ama böyle bir geçitten geçmeyi ister miydin gerçekten? Dönüşü yok çünkü...

8. Bölüm - SONUÇ

48-Ne olacak bu evrenin hali?

- *Ama bizim evrenin geleceğini konuşmadık zaten...*
- Doğru, çünkü içeriği ile birlikte konuşmak istedim. Bunun için de önce kara delikleri konuşmamız gerekiyordu...

Evrenin Hubble parametresi, yani uzak gökadaların bizden uzaklaşma hızları ile mesafeleri arasındaki oran, ölçülebiliyor. Tabii ki bu ne kadar büyükse, evrenin genleşme eğilimi de o kadar yüksek; dolayısıyla, genleşmeyi durdurmak için evrende o kadar yüksek “çekim”, yani kütle gerek. Daha doğrusu yoğunluk...

- *Yani evrenin yoğunluğu bir kritik değerin üstündeyse, genleşme gelecekte bir noktada durup tersine dönecek; yoğunluk o değerin altındaysa, genleşme hiç durmayacak, öyle mi?*
- **Madde-baskın** evren için bu böyle...
- *Neden şartlı onay? Hem bu şart ne demek? Galiba bu terim Einstein evreni çerçevesinde de geçmişti...*
- Evrenin dinamiğinin genel göreliliğe uyduğunu konuşmuştuk (Soru 42); evrenin uzaysal boyutlarda üç farklı tür geometriye (kapalı-düz-açık) sahip olabileceğini de; evrenin kozmolojik ölçekteki içeriğini bir ideal akışkan olarak kabul ettiğimizi de; ideal akışkanların özelliklerinin basınç-yoğunluk ilişkisi ile betimlendiğini de...[111]

111)Matematiksel ayrıntı isteyenlere: 186. sayfadaki 70. dipnotta verdiğimiz iki Einstein denkleminin birincisinden, $k = 0$ alarak hesaplayacağımız yoğunluğa kritik yoğunluk ρ_c denir. Kolayca görebiliriz ki, $\rho > \rho_c$ ise $k = +1$, $\rho < \rho_c$ ise $k = -1$ olmak zorundadır.

- *Yani evrenin ne olacağını "evrensel akışkanın" basınç-yoğunluk ilişkisi belirliyor...*

- Evet. Soru 42'de bu tip iki ilişkiden de bahsedip, **madde** ya da **toz** ($p = 0$) ve **ışınım** ($p = \rho/3$) tanımlarını da yapmıştık. Basınç-yoğunluk ilişkisi, aynı zamanda, bu akışkanın yoğunluğunun evrenin genleşmesiyle nasıl değiştiğini de belirler. Basınç/yoğunluk oranı ne kadar büyükse, akışkanın yoğunluğu genleşmeyle o kadar hızlı azalır. Bunun açıklaması ise, daha yüksek basınçlı gazın genleşme ile daha fazla iş yapıp, daha fazla enerji kaybetmesi.[112] Özelde, $(a^3\rho)$ büyüklüğünün pozitif basınç için zamanla küçüldüğünü, sıfır basınç için sabit kaldığını görürüz.

112)Matematiksel ayrıntı: Bunu, kozmolojik Einstein denklemlerinin ikincisini, birincisi (ve türevi) ile birleştirerek de gösterebiliriz.

Evrendeki yoğunluğun büyük çoğunluğunun **madde** özelliğine sahip olması, evrenin madde-baskın olması olarak nitelendiriliyor. Ve genel görelilik bize, bahsettiğin gelecek alternatiflerinin ancak bu durumda geçerli olduğunu söylüyor.[113]

113)Matematiksel ayrıntı isteyenlere: Birinci denkleme bakın. Madde-baskın evrende, ρ işaret değiştiremez ($a^3\rho$ sabit). Bu durumda, $k = -1$ ise v hiçbir zaman sıfır olamaz, yani evrenin genleşmesi durmaz. $k = +1$ durumunda ise, evren genleştikçe hem κρ hem kc^2/a^2 küçülür, ama daha büyük olan κρ daha hızlı küçülür. (Örneğin a iki misline çıksa, κρ sekizde bire, ama kc^2/a^2 dörtte bire iner.) Ve eninde sonunda bu iki büyüklük mutlaka eşitlenir. Bu da v'nin sıfır olması, yani evrenin genleşmesinin durması demektir; buradan sonra da çöküş başlar. (İvme her zaman negatif, ikinci denkleme bakın.) $k = 0$ ise bu iki durum arasında bir tür sınır durumu; genleşme sonsuza kadar devam ediyor $k = -1$ gibi, ama genleşme hızı sıfıra yaklaşıyor.

- *Peki, evrenimiz madde-baskın mı, değil mi?*

- Yaklaşık 2000 yılına kadar, evrenin ilk birkaç yüz binyılı hariç öyle olduğunu düşünüyorduk; çünkü öyle görünüyor: Gökadaların oluşturduğu "akışkan", madde özelliğine sahip ve kozmik ardalan ışınımının enerji yoğunluğu, maddeden çok az...

- ***2000 civarında ne oldu da bu düşüncemiz değişti? Ne yönde değişti?***

- Neden değiştiğini biraz sonraya bırakalım; ne yönde değiştiği konusunda da şimdilik şunu söyleyeyim: Geçmişin önemli bir kısmında evren madde-baskındı; ama şimdiki zaman ve gelecekten emin değiliz... Bu durumda, madde-baskın evren modellerini

anlamaya çalışmakta hâlâ fayda var; özellikle bunların daha basit modeller olduğu düşünülürse...

Madde-baskın bir evrenin gelecekte ne olacağı ile ilgili İngilizce'de çok güzel bir kelime oyunu yapılabiliyor: DESTINY ↔ DENSITY. Yani "kader" (destiny), yoğunluk (density) tarafından belirleniyor. Gelecek aynı zamanda evrenin şekliyle de bire bir ilişkili çıktığından, bir diğer güzel ifade şekli de şu: Evren uzayda sonlu (yani kapalı) ise, zamanda da sonlu (yani genleşip, durup, çökecek); uzayda sonsuz (yani açık) ise, zamanda da sonsuz (sonsuza kadar genleşecek).

- *İlk birkaç yüz bin yılda evren madde-baskın değilse, nasıldı?*

- Artık kozmolojinin standart modelinin parçası olan Büyük Patlama modeline göre (Soru 43'ü anımsa) ilksel evren çok sıcaktı; o kadar ki, tüm parçacıklar ışık hızına yakın hızlarla hareket ediyorlardı. Böyle bir durumda, parçacıklar kütleli bile olsalar, basınç-yoğunluk ilişkisi ışınım gibi olur.

- *Yani ilksel evren ışınım-baskın idi...*

- Bunu görmenin bir yolu daha var. Işınımın basınç/yoğunluk oranı maddeninkinden yüksek olduğu için, evrenin genleşmesi ile yoğunluğu maddeninkinden daha hızlı düşüyor. Işınımın bugünkü düşük enerji yoğunluğu, evrenin genleşmesiyle düşmüş hali. Geçmişe gidildikçe yoğunluk artıyor, ama ışınımın yoğunluğu maddeden daha hızlı artıyor. Bir de fotonların madde parçacıklarına korkunç sayısal üstünlüklerini (gene Soru 43'ü anımsa) düşününce...

- *Geçmişe giderken bir noktada ışınım enerji yoğunluğu maddeninkini geçiyor...*

- Evet. İşin ilginci, bu değişim noktası, evrenin opaklıktan şeffaflığa geçiş, yani kozmik ardalan ışınımının serbest kalma zamanına aşağı yukarı denk geliyor... Bu aşamadan sonra evren madde-baskın.

20. yüzyılın sonları yaklaşırken, madde-baskın olduğu düşünülen evren hakkındaki belki de en önemli soru, geleceğinin ne olacağı idi. Evrenimiz bu üç modelden hangisine uyuyordu? Kapalı mı, açık mı? Büyük Patlama'nın tersi olan bir Büyük Çöküş'te cehennemi sıcaklıklara mı ulaşacak, sonsuza kadar genleşip, sonsuza kadar soğuyacak mı? Ateş ile mi, buz ile mi[114] bitecek?

114)FIRE and ICE / ATEŞ ve BUZ

Some say the world will/ Bazıları dünyanın ateş ile

end in fire, biteceğini söyler,
Some say in ice./ Bazıları da buz.
From what I’ve tasted of desire/ Arzudan tattığım kadarıyla
I hold with those who favor fire. / Ateşi tercih edenleri tutuyorum ben.
But if it had to perish twice, / Ancak iki kez yok olmam gerekirse,
I think I know enough of hate / Nefreti de yeterince biliyorum;
To know that for destruction ice / Bilecek kadar mahvetmek için buzun da
Is also great / Muhteşem ve
And would suffice. / Yeterli olduğunu.

Robert Frost (dört Pulitzer Ödüllü şair), 1920;
yazarın (İS) çevirisi.

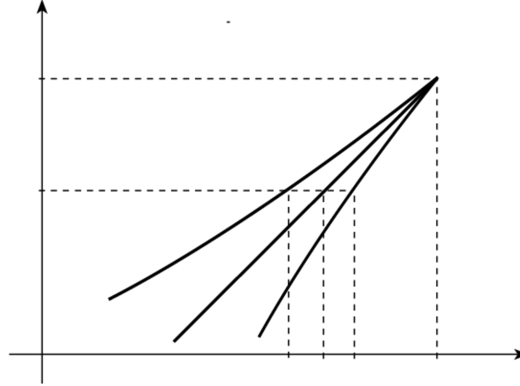
- *Bunun için yoğunluğu ölçmek gerek galiba...*
- Evet... Ancak yıldızların evrendeki dağılımlarına bakıldığında, onların kritik yoğunluğun ancak yüzde birkaçını oluşturabildiği görüldü—
- *Bir dakika, bir dakika... Kritik yoğunluğu nereden biliyoruz?*
- Bu sorunun ikinci paragrafından anlaşılacağı gibi, Hubble parametresinden hesaplanabiliyor.

Sonra bilimciler kendilerine yıldızların kütleyi ne kadar iyi temsil ettiğini sordular. Zaten uzaklardaki tüm yıldızlar görülemiyor. Ancak, Soru 46’da konuştuğumuz gibi, bir cismi görmeden de, etrafında hareket eden cisimlerin hareketine bakarak onun kütlesini ölçebiliyoruz... Bu yöntem kullanılınca, gökadaların çoğunda görünenden çok daha fazla kütle olduğu görüldü. Hatta görmek derken, yalnızca görünen ışığı kastetmiyoruz, elektromanyetik tayfın hiçbir kısmında görünmeyen maddeler bunlar. Yani ne radyo dalgası yayıyor, ne kızılötesi, ne X ışını, hiçbir şey... İşte bu kendisi görülemeyen ama etkisi görülen maddeye “karanlık madde” dendi.

Şekil 60. Kozmolojik süpernova gözlemleri ve evrenin genleşmesinin ivmesi.

Bu $a(t)$–t grafiğinde t_0 şimdiki zamanı, a_0 da evrenin ölçek faktörünün şimdiki değerini gösteriyor. Bir süpernovanın ölçülen kırmızıya kayması, bize doğrudan ölçek faktörünün patlama anındaki değerini veriyor; yani grafikte düşey eksende nerede olduğumuzu söylüyor. Ancak bu anın ne kadar geçmişte olduğu, grafikten görüldüğü gibi, $a(t)$ fonksiyonunun şekline bağlı. Evrenin ivmesi sıfırsa (doğru çizgi) patlama t_{II} anında; evren madde-baskın modellerin öngördüğü gibi yavaşlıyorsa, patlama daha sonraki bir t_{III} anında olmuştur. Patlama günümüze ne kadar yakınsa, ışık o kadar az yol gideceğinden, o kadar parlak olarak gözlenmesi beklenir.

Ancak, ölçülen parlaklıklar t_{II}, yani sıfır ivme için beklenenden daha düşük çıktı. Bu da patlamanın t_{II}'den önceki bir t_I anında olduğu, yani genleşmenin ivmelendiği anlamına gelir.



Şekil 60. Kozmolojik süpernova gözlemleri ve evrenin genleşmesinin ivmesi. Bu $a(t)$–t grafiğinde t_0 şimdiki zamanı, a_0 da evrenin ölçek faktörünün şimdiki değerini gösteriyor. Bir süpernovanın ölçülen kırmızıya kayması, bize doğrudan ölçek faktörünün patlama anındaki değerini veriyor; yani grafikte düşey eksende nerede olduğumuzu söylüyor. Ancak bu anın ne kadar geçmişte olduğu, grafikten görüldüğü gibi, $a(t)$ fonksiyonunun şekline bağlı. Evrenin ivmesi sıfırsa (doğru çizgi) patlama t_{II} anında; evren madde-baskın modellerin öngördüğü gibi yavaşlıyorsa, patlama daha sonraki bir t_{III} anında olmuştur. Patlama günümüze ne kadar yakınsa, ışık o kadar az yol gideceğinden, o kadar parlak olarak gözlenmesi beklenir. Ancak, ölçülen parlaklıklar t_{II}, yani sıfır ivme için beklenenden daha düşük çıktı. Bu da patlamanın t_{II}'den önceki bir t_I anında olduğu, yani genleşmenin ivmelendiği anlamına gelir.

- Bunlar kara delik olmasın?

- Evet, kara delikler (en azından etraflarından madde yutmuyorlarsa) karanlık madde özelliği gösterebilir. Bazı diğer tip soğumuş ölü yıldızlar (beyaz cüceler veya nötron yıldızları)... Çekirdek kaynaşma tepkimeleri başlatacak kadar yüksek sıcaklık ve

basınç oluşturamamış, dolayısıyla yıldız olamamış kütle birikimleri, yani kahverengi cüceler[115]... Bunlar da ışık vermeyebilir...

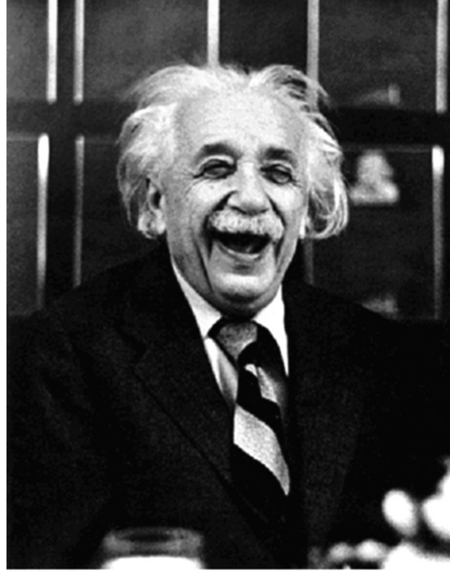
115)İngilizce: Brown dwarf.

- *Tamam o zaman... Karanlık madde bunlar olabilir.*

- İyi de, onlar veya değil, **ne kadar** olduğunu bilmemiz gerekiyor. Hani bize evrenin yoğunluğu lazım ki geleceği tahmin edelim... İşin kötüsü, karanlık maddeyi “görmemizin” tek yolu olan yörüngelere bakmak yöntemi, yörüngeden daha büyük bir ölçekte düzgün dağılmış karanlık madde var ise dahi, bize göstermiyor; Hasandağ’ın tepesinden bakarak Konya Ovası’ndan yüksekliğini kestirebileceğin, ama deniz seviyesinden yüksekliğini kestiremeyeceğin gibi... Bu yüzden ölçüm ölçeği büyüdükçe, karanlık madde yoğunluğu da büyüyor. En büyük ölçeklerde bu rakam, kritik yoğunluğun yüzde 20’sine yaklaşıyordu.

- *Peki ne yapacağız?*

- Hani 43. Soru’nun sonunda, erken evrendeki nükleer tepkimelerle ilgili hesaplar ile ölçümlerin belli bir foton/baryon sayıları oranı aralığı için uyuşabildiğini konuşmuştuk. Bu bize evrendeki baryon yoğunluğu hakkında bir fikir verir. 27. Soru’da konuştuğumuz gibi, baryon sayısı korunur. En düşük kütleli baryonlar da protonlar ve nötronlardır, dolayısıyla eninde sonunda evrende ilk baryon yoğunluğuyla aynı sayısal yoğunlukta proton ve nötronlar kalır. Bildiğimiz gibi, normal madde bunlar ve elektronlardan oluşur; elektronların kütlesi de proton ve nötronlardan çok küçük olduğuna göre, normal maddenin evrendeki kütle-enerji yoğunluğu hakkında fikir sahibi olmuş oluruz.



- *Vee...*

- Bu hesaplar da ilkönce bize normal madde yoğunluğunun, kritik yoğunluğun **en fazla** yüzde 20'si olabileceğini söyledi. Yani bir bakıma hâlâ karanlık maddeyi -kıl payı da olsa- adeta kararmış normal madde olarak açıklayabilirdik. Ancak, bir de **şişen evren**[116] kuramı var ki, bize evrenin yoğunluğunun kritik değere eşit olması gerektiğini söylüyor.

116)İngilizce: Inflationary Universe ya da kısaca Inflation.

- *Bu şişen evren, Büyük Patlama'ya alternatif mi?*

- Hayır, yama. Şöyle ki, Büyük Patlama modelini geçmişe doğru takip edersek, bazı tutarlılık sorunları çıkıyor; bu sorunların olmaması için evrenin, çok erken zamanlarda farklı bir evreden geçmiş olması gerektiği düşünülüyor. Şişen evren kuramı işte bu evre nasıl başlar, nasıl biter, sorunları nasıl çözer, onu anlatıyor.

- *Nedir bu Büyük Patlama'nın tutarlılık sorunları?*

- Birincisi, **ufuk sorunu**. Ufuk uzaklığı ya da uzunluğu diye, görebildiğimiz mesafeye diyoruz; mantıklı değil mi? Bu da bir ışık sinyalinin Büyük Patlama'dan bu yana evrende gidebileceği mesafedir. Şimdi, kozmik ardalan ışınımını gökyüzünde iki zıt yönde gözlemlersek, gördüğümüz noktalar—

- *...bizden neredeyse bir ufuk uzaklığı mesafededir.*

- Çok iyi... ardalan ışınımını tam Büyük Patlama'dan gelmiyor çünkü. Bu noktalar zıt yönlerde oldukları için birbirlerinden yaklaşık

iki ufuk uzaklığı mesafesindeler. Şimdi... Ama **ufuk uzaklığı** doğal olarak **zamanla büyüyor**. O ışık sinyalleri yola çıktığı zaman, ufuk uzaklığı çok daha küçüktü, dolayısıyla bu iki nokta o zamanın ufuk uzunluğuna göre birbirlerinden çok uzaktaydılar.

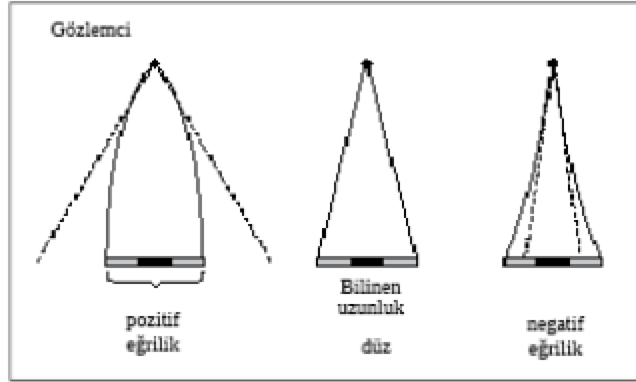
- *Ama o iki nokta da birbirine daha yakındı, dolayısıyla belki gene yaklaşık iki ufuk uzaklığı mesafede olamazlar mı?*

- Hayır. Noktalar arası uzaklık, yalnızca evrenin genleşmesi ile artar; ama ışık, evrende seyahat ederken noktaları bir bir geçtiği için ufuk uzaklığı daha hızlı artar. Ufuk sorunu şudur: İki sistemin aynı sıcaklığa gelmesi ancak aralarında ısıl etkileşim olması durumunda mümkündür. Ancak herhangi bir etkileşim en fazla ışık hızı ile ilerleyebilir, dolayısıyla bir nokta, kendisinden en fazla ufuk uzaklığı mesafesindeki noktaları etkileyebilir. Öyleyse bahsettiğimiz noktalar, yani **aralarında yüzlerce ufuk uzaklığı bulunan iki nokta, nasıl etkileşip aynı sıcaklığa gelmişlerdir?**

- *Hmm... Bu bir. İkincisi?*

- İkincisi, **düzlük sorunu**. Gösterilebiliyor ki, madde-baskın evrenin yoğunluğu, genleştikçe kritik yoğunluktan uzaklaşır.[117] En basitinden, kapalı evrenin duraklama

117)Matematiksel ayrıntı: Bunu daha genel durumda görmek için, kozmolojik Einstein denklemlerinin ilkine bakın. Madde-baskın evren için son terim $1/a^3$ ile orantılı. Dolayısıyla evren genleştikçe (*a* büyüdükçe), $1/a^2$ ile orantılı olan ikinci terimin önemi artar. Kritik yoğunluk ise ilk terime karşılık gelen yoğunluktur. (Diğer deyişle, düz evren ikinci terimin sıfır olduğu evrendir.)



Şekil 62. Eğrilik ve görünen açısal büyüklük ilişkisi.
Eğriliği pozitif olan (yani kapalı) evrende, paralel başlayan ışınlar yakınsar; bu da uzunluğu ve mesafesi bilinen bir cismin açısal büyüklüğünün düz evrende olacağından büyük görünmesine yol açar. Eğriliği negatif olan (yani açık) evrende ise paralel ışınlar ıraksar, bu da görünen açısal büyüklüğü küçültür.
Burada bilinen uzunluk, evrenin plazma halindeki dalgalanmalarının baskın dalga boyudur. Bu gözlem kozmik ardalan ışınımına bakılarak yapılır.

anında kritik yoğunluğu sıfıra iner, yoğunluğu ise sıfır değildir, yani yoğunluk/kritik yoğunluk oranı sonsuza çıkmıştır. Yoğunluk/kritik yoğunluk oranı şu anda birden çok farklı değil; bu sorunların artaya konduğu 1970’ler sonlarında bu oranın 0,1 ile 2 arasında olması gerektiği biliniyordu; yani 10^{-8} veya 10^{8} değil. Öyleyse geçmişte bire daha yakın olmuş olması gerekir. Özelde, Büyük Patlama’ya adını veren termonükleer tepkimeler zamanında bu oranın birden farkının ancak virgülden sonra 10-11. hanede olacağı hesaplanabiliyor. Düzlük sorunu şudur: **Neden başlangıçta yoğunluk kritik değere bu kadar yakındı?** Yani evren düz olma durumuna neden bu kadar yakındı?

- *Bu ikincisi; ilginç... Sonra?*

- Üçüncüsü, **monopol sorunu**. Bu da, genelçekim haricindeki üç etkileşimi birleştirme iddiasındaki Büyük Birleştirme Kuramları’nı[118] ilksel evrene uygulayınca ortaya çıkıyor. Bu kuramların öngörüsüne göre, etkileşimlerin özellikleri sıcaklıkla değişir ve yeterince yüksek sıcaklıklarda bu üç etkileşim ayırt edilemez hale gelir; yani birleştirme, yüksek sıcaklık ile gerçeklenir. Hatta bu değişim, buzun erimesi gibi bir faz geçişi şeklinde olur.[119] Kuramlar gösteriyor ki, bu faz geçişi sırasında **manyetik monopol** dediğimiz kararlı yapıların

oluşması gerekiyor. Bunlar, aynen elektrik yüklü nesnelerin elektrik alan çizgilerinin kaynağı olmaları gibi, manyetik alan çizgilerine kaynaklık yapacak nesneler ve elektromanyetizmanın temel yasaları olan Maxwell Denklemleri, kolayca bunları da betimleyecek hale getirilebilmesine rağmen, evrenimizde bunlardan yok. (Yani Maxwell Denklemlerinde ilgili terimler sıfır.)

118)İngilizce: Grand Unified Theories (GUTs).

119) Bu epey ileri bir teknik kavram, ama olan tam doğru ifadesiyle şudur: Bu faz geçişinde evrenin temel hali, bir diğer deyişle, boşluğun (vakum) tanımı değişiyor.

Öte yandan, bu manyetik monopollerin kütleleri epey yüksek, dolayısıyla ısıl dengede (aynı sıcaklıkta) oldukları diğer parçacıklar hâlâ hızlı hareket edip, ışınım gibi davranırken, onların çok daha erkenden yavaşlayıp, madde gibi davranmaları gerekir. Bu da, evrendeki diğer parçacıkların yoğunluğunun monopollerinkinden daha hızlı azalması, yani zamanla monopollerin baskın hale gelmesi demektir. **Neden günümüz evreninde monopol görmüyoruz?**

- *Pekiii...?*

- Çözüm önerisi, monopol sorununa neden olan faz geçişi kavramından çıktı. Daha dikkatli incelemeler gösterdi ki, eğer bu faz geçişi evrenin her yerinde aynı anda olmaz ise, bazı bölgeler bu faz geçişini gecikmeli yaparlar ise -ki suyun donması vb. gibi daha günlük hayata yakın faz geçişlerinde de bu gözlemlenebiliyor- bu geciken bölgelerdeki boşluğun bir basıncı ve yoğunluğu varmış gibi oluyor. Üstelik, basınç-yoğunluk ilişkisi de çok garip: $p = -\rho$. Bu ilişki, evrenin çok hızlı, $a(t)$'nin (aşağı yukarı) üstel fonksiyon olduğu bir şekilde genleşmesine yol açıyor.[120] Tabii ki bu, faz geçişi tamamlanana kadar sürüyor, sonra ışıma-baskın genleşmeye geri dönülüyor. Şişme evresi diye bu evreye deniyor.

120) Matematiksel ayrıntı: Önce 112. dipnotta tarif edilen yöntemle ρ'nun sabit olduğunu gösteriyorsunuz. Sonra ilk denklemden, integralle $a(t)$'nin $k = 0$ için üstel fonksiyon, diğer k degerleri için hiperbolik fonksiyon olduğunu gösterebilirsiniz. Bu hiperbolik fonksiyonlar da çabucak üstele yakınsar.

Eğer bu evre, $a(t)$'nin en az 10^{30} misli büyüyeceği[121] kadar sürerse, üç sorun birden çözülüyor—

121) İsim, ekonomideki "para şişkinliği" -enflasyon kavramına bir gönderme. Hiperenflasyon (örneğin 1920'lerin Almanya'sında) hakkında biraz araştırma yaparsanız, benzerliği göreceksiniz.

- *10^{30} mu? Bu çok büyük bir rakam...*

Aslında kullanılan rakam 10^{50}. Bunun için 10^{-32} saniyelik bir sürenin yeterli olduğu hesaplanıyor.

- *Sorunlar nasıl çözülüyor?*

- Şişme, çok küçük bir bölgeyi çok büyük hale getiriyor; ama orijinal bölge çok küçük olduğu için, ısıl dengeye gelmiş oluyor. Rakam vermek gerekirse, şişme öncesi ufuk uzunluğu, 10^{-26} m gibi. Şişme, bu bölgenin büyüklüğünü 10^{24} m yapıyor. Öte yandan, evrenin bizim gözleyebildiğimiz kısmının şişme sonrası büyüklüğü 10 cm.

- *Bu, başta bahsettiğimiz iki noktanın ısıl dengesini açıklıyor, yani ufuk sorununu çözüyor. Ya diğerleri?*

- Eh, şişen bir balon daha düz hale gelir[122], değil mi? Ayrıca bu korkunç büyüme, şişme öncesi oluşabilecek monopollerin sayısal yoğunluğunu da korkuç azaltır.

122) Matematiksel ayrıntı: İlk denkleme bakın. ρ sabit ise, $a(t)$ büyüdükçe k'lı terimin önemi azalır.

- *10^{-150} ile çarpıyor... Böylece düzlük ve monopol sorunları da çözülüyor... Güzelmiş...*

- Peki, Şişen Evren kuramı doğruysa, evrenin yoğunluğunun kritik değere eşit ya da çok yakın olması gerekir

- *Öyleyse, ilksel nükleer tepkime hesapları da bize normal madde en fazla kritik yoğunluğun yüzde 20'sidir diyorsa, evrenin içeriğinin yüzde 80'i bilmediğimiz bir madde mi?*

- En az yüzde 80'i, belki yüzde 97'si. Yaklaşık 1980-2000 arası böyle düşünülüyordu. Bu, neredeyse skandal boyutlarında bir sorun; siz evrendeki maddenin temel yapıtaşları üzerine deneyler yapıyor, uzun uzun kuramlar geliştiriyor, bir "parçacık fiziği standart modeli" oluşturuyorsunuz; ama model, evrendeki parçacıkların (aslında kütlenin) belki de ancak yüzde 3'ünü açıklıyor! Bu sorun, en büyük—

- *2000 civarında neyin değiştini hâlâ söylemediniz yalnız...*

- Geliyorum, geliyorum... Ne diyordum; bu sorun en büyük ölçekteki fizikle en küçük ölçekteki fiziği bir araya getiriyor. Düşünsene, kozmolojide gökadaları atom gibi kabul ediyoruz; parçacık fiziğinde atomun büyüklüğünün milyonda birinden daha küçük ölçeklerle uğraşıyoruz...

Tabii ki buradan nereye gideceğimiz açık. Madem parçacık fiziğinin standart modeli karanlık maddeyi açıklayamıyor, biz de standart modelin dışına bakarız... Zaten parçacık fiziği kuramcıları çeşitli sebeplerden standart modelin çeşitli genellemelerini düşünmüşlerdi.

- *Neden? Standart modelde bir yetersizlik mi vardı ki?*

- Bu biraz da bakış açına bağlı... Örneğin, modeli yeterince basit bulmayanlar var, dört etkileşim olması anlamında. Bu dört rakamını küçültebilir miyiz[123] acaba? (Aslında zaten elektrozayıfla üçe indi 1980'lerden sonra.) Bir "birleşik alan kuramı" geliştirebilir miyiz? Ya da modeli veya bazı bileşenlerini "güzel" bulmayanlar[124], "zorlama" bulanlar var; bu da bakış açısına bağlı tabii.[125] Ve son olarak, acaba gözlenmemiş (ve yakın gelecekte gözlemlenebileceğini umabileceğimiz) ne tür parçacıklar var olabilir?

123)Şişen evren kavramı bağlamında bahsettiğimiz büyük birleştirme kuramları, bu çabalara bir örnektir.

124)Örneğin, kuramda filanca ve falanca enerjilerin oranı, bir trilyon mertebesinde. Halbuki, bu oranın bir civarında olmaması için bir neden yok.

125)Tabii ki bu konulara daha önce de konuştuğumuz "evrenimiz böyle" mantığıyla (Soru 23) yaklaşmak da mümkün. Aksi düşünceler, evrenin daha "basit" (yine Soru 23) ya da kuramın matematiksel yapısının daha "güzel" olması gerektiğini düşünmekten kaynaklanıyor. Öte yandan güzellik herkes için aynı anlama gelmeyebilir:

"...Ben güzele güzel demem / Güzel benim olmayınca /..." - Karacaoğlan; "Güzelliğin on par'etmez / Şu bendeki aşk olmasa /…" - Âşık Veysel; "Beauty is in the eye of the beholder." (Güzellik, bakanın gözünde / gönlündedir.) - Margaret Wolfe Hungerford.

En büyük ile en küçüğün fizikleri burada yakınsıyor işte: Bu motivasyonlarla üretilen çeşitli kuramların içerdiği parçacıkların kararlı olduğu düşünülenleri, ön plandaki karanlık madde adayları oldu; öte taraftan karanlık madde problemi, standart modeli genelleştiren parçacık kuramları üretmenin estetik ve felsefi kaygılarının ötesinde yeni bir motivasyonu olarak kabul edilmeye başlandı.

- *Nedir bu karanlık madde adayları?*

- Kozmik ardalan fotonları gibi, bir de nötrino ardalanı vardır. Standart modelde kütlesiz olarak düşünülen nötrinoların küçük de olsa bir kütlesi olması, evrenin yoğunluğuna epey katkıda bulunabilir... İlk düşünülen karanlık madde adaylarından biri bu oldu; ancak nötrinoların, evrende gökadaların oluşum sürecinde gerekli

yerel ölçekli kümelenmeyi yapmak için bile fazla hızlı olduğu sonucuna varıldı. (Işığa yakın hızlarda hareket ettikleri için yerel yoğunluk fazlalıkları onları tutamıyor.) Aslında yakın zamanda Güneş fiziğinden, üç nötrino türünden en az birinin kütleli olduğu anlaşıldı[126], ancak bu sonuç hâlâ geçerli.

126)Bu aslında, parçacık fiziğinin standart modelinin yetersiz olduğunu gösteren ilk gözlemsel veri.

Bir diğer düşük kütleli aday, **axion**[127] denen parçacıklar. Nereden icap ettiğine giremeyeceğim ama, düşük kütlelerine rağmen bu parçacıklar (varsalar) hızlı değiller. 2010 itibari ile CERN'de CAST adlı (hızlandırıcılarla ilgisi olmayan) deneyde[128], Güneş'ten gelmesi olası axionlar gözlemlenmeye çalışılıyor.

127)Bu ad ABD'de çok satılan bir çamaşır suyunun markasıdır.

128)2007 Isparta uçak kazasında yitirdiğimiz meslekdaşlarımızdan Engin Arık ve Berkol Doğan bu deneyde aktiftiler; Boğaziçi ve Doğuş Üniversiteleri'nin yüksek enerji fiziği gruplarının oluşturduğu ekibin CAST'daki önemli paydaşlığı sürmektedir.

Olası yüksek kütleli karanlık madde parcacıkları WIMP diye adlandırılıyor. WIMP, İngilizce "weakly interacting massive particle", "zayıf etkileşen kütleli parçacık" ifadesininin kısaltması.

- Zayıf etkileşmek derken?

- Etkileşimin şiddetinin genelde düşük olmasından bahsediliyor tabii. Soruyu sorduğuna göre tahmin etmiş olduğun gibi, standart modeldeki "zayıf etkileşim" kastedilmiyor—

- Çünkü neredeyse tanım gereği, karanlık madde parçacıkları standart modelin dışında olmak durumundalar... Peki yüksek kütleli demek ne demek? Neyden yüksek kütleli?

- WIMP'ler genellikle protondan epey yüksek kütleli olarak düşünülüyor. Ancak, aslında önemli olan parçacığın kütlesi değil, onların oluşturduğu gazın eşdeğer sıcaklığı, yani gelişigüzel parçacık hızlarının mertebesi. Yüksek hızlarla hareket eden parçacıkların hem basınç-yoğunluk ilişkileri ışınım ile benzeşiyor, hem de hızları ve düşük etkileşimleri sayesinde kümelenme bölgelerinden kaçıyorlar; yani kümelenmeye katkıda bulunmuyorlar. Düşük hızlarla hareket edenler ise, hem basınç-yoğunluk ilişkileri bakımından **toz** ile benzeşiyorlar, hem de kümelenme bölgelerinde kendileri de birikerek kümelenmeye, yani gökada ve daha büyük ölçekli yapıların

oluşumuna katkıda bulunuyorlar. Bunlara sırasıyla sıcak ve soğuk karanlık madde deniyor.

- *Yani kütleli nötrinolar sıcak karanlık madde, axionlar ve WIMP'ler soğuk. Ama hâlâ karanlık madde yoğunluğu hakkında bir şey söylemediniz... Şişen evren kuramının söylediği gibi kritik yoğunluğa ulaşıyor mu? Biliyor muyuz?*

- İşte bu soruyu cevaplamak için 2000 yılına doğru—

- *Oh be, nihayet!...*

- ... evrenin genleşme ivmesini (daha doğrusu ***i/a*** oranını) ölçmeye yönelik gözlemler yapıldı. Madde-baskın bir evrende bu bize yoğunluğu verir.[129] Bu gözlem için çok çok uzak süpernovaların gözlenen ışıma şiddetleri ölçüldü—

129)Matematiksel ayrıntı isteyenler, 186. sayfadaki 70. dipnottaki iki Einstein denkleminden, ***p*** = 0 ise, ***i/a***'yı bilmenin bize ρ'yu vereceğini teyit edebilirler.

- *Süpernovaların kozmolojiyle ilgisi ne?*

Bunlar Ia tipi süpernovalar, kara delik bağlamında konuştuklarımız değil. Bunlar çok özel koşullarda[130] meydana gelen olaylar ve bu kadar özel olmak, onları **standart mum** (Soru 41) yapıyor. Kozmolojiyle ilgileri de bu. Yeterince uzak mesafeden görülebilen standart mumların varsa, evrenin geçmişteki genleşme hızıyla ilgili bilgi elde edebilirsin...

130)Tip Ia süpernovalar, yüksek (yani Chandrasekhar limitine yakın) kütleli bir beyaz cüce ile bir kızıl devin oluşturduğu çift-yıldız sistemlerinde meydana gelebiliyor. Beyaz cüce, partnerinden madde çekiyor. Bu kütle akımı beyaz cücenin yüzeyine düşerken, getirdiği kinetik enerjinin ısıya dönüşmesi sonucu beyaz cüce ısınıyor... Beyaz cüce, zaten yüksek kütleli olduğu için yarıçapı da küçük. (Soru 45'e dönebilirsiniz.) Dolayısıyla bu ısınma etkisi de olabildiğince güçlü. O kadar ki, beyaz cüceyi oluşturan yıldızın kızıl dev evresinde çekirdeğinin ulaştığı en yüksek sıcaklık aşılıyor, dolayısıyla o evrede meydana gelenlerden sonraki tepkime başlıyor. Ancak bu kez, tepkime zincirleme bir şekilde devam ediyor, çünkü beyaz cüceyi dengede tutan Fermi basıncı, sıcaklıktan büyük ölçüde bağımsız olduğundan, beyaz cüce genleşip sıcaklığı düşürerek tepkimeyi kontrol altına alamıyor. Oluşan patlamanın enerjisi, beyaz cüceyi dağıtmak için yeterli. Meydana gelen gaz bulutunun, sıcaklığıyla verdiği ışınım, uzaklardaki astronomlar tarafından parlak bir yıldıza benzer, ancak geçici bir nesne olarak görülüyor.

- *Biraz düşüneyim... 20. Soru'da da biraz konuştuğumuz gibi, uzağa baktığımız zaman, geçmişe de bakmış oluyoruz... Mesafeyi standart mum yöntemiyle belirlersek, ışık hızına bölerek baktığımız cismin ne kadar önceki halini gördüğümüzü de biliriz. Doppler kayması da bize hızı verir; değil mi?*

- Tam olarak böyle değil ama, aynı kapıya çıkıyor. Bu kadar uzak süpernovaları gözlemlemek teknolojik olarak yakın zamanda mümkün oldu ve bunlar hakikaten çok uzak. Bir düşün: Evrenin bir yerinde bir beyaz cüce, partneri ile etkileşimi sırasında patlıyor ve etrafına çok güçlü elektromanyetik dalgalar saçıyor. Bu esnada, evrenin uzak bir yerinde, hatta belki de Büyük Patlama'dan beri ışığın gidebileceği mesafeden de uzakta bir sarmal gökadanın diskindeki kollardan birinin içinde bir gaz ve toz bulutu, çekim etkisiyle büzüşmekte. Dalgalar etrafa yayılmaya başlıyor, on binlerce yıl sonra, gökadanın gaz ve toz bulutlarında soğurulmayan kısmı, gökadalararası boşluğa çıkıyor; en yakın gökadaya ulaşmaları birkaç milyon yıl sürüyor. Onu ve birçok başkalarını geçiyorlar, milyon yıllar on milyonlara, yüz milyonlara uzuyor; gökadalar uzun bir otomobil yolculuğunun mesafe tabelaları sanki: Gümüşhacıköy 23, Samsun 150 km... Büzüşen bulutta ise, başlangıçta var olan küçük yoğunluk farklılıkları, daha yoğun olan kısımların etraflarını daha kuvvetli çekmesi sayesinde yavaş yavaş belirginleşiyor, daha da belirginleşiyor; ve bulut, ilk halinden yüzlerce kez yoğun onlarca parçaya ayrılıyor. Dalgalar evrenin içinde yolculuklarına devam ediyorlar. Bulutun içinde artan yoğunlukların etkisiyle olaylar hızlanıyor. Dalgaların iki gökadanın arasındaki mesafeyi geçişi kadar bir sürede, yani yıldızına yakınca bir gezegenin yörünge periyoduna göre çok uzun, ama dalgaların evren içindeki yolculuğuna göre çok kısa bir sürede, bulut parçaları daha da yoğunlaşıyor ve belki tekrar parçalanıyorlar; yoğunlaşmanın sonucu olarak önce hafiften ısınmaya başlıyorlar, sonra merkezleri atomları parçalayacak ve ışığın hareketine izin vermeyecek kadar ısınıyor, bu da büzüşmenin getirdiği ısının kaçmasını engelleyip, ısınmayı hızlandırıyor. Sonunda bulut parçalarının yüzeyleri, normal bir yıldız gibi ışık verecek sıcaklığa ulaşıyor, yani önyıldız oluyorlar; ışık basıncının büzüşmeye karşı koyması yüzünden olaylar tekrar yavaşlıyor. Önyıldızlar, ışımaları için gerekli enerjiyi çekim potansiyelinden elde ederek büzüşürken, dalgalar her yönde onlarca gökadayı daha geçiyor. Önyıldızların yeterince kütleye sahip olanları sonunda merkezlerinde yeterli yoğunluk ve ısıya ulaşıyorlar ve hidrojen çekirdekleri kaynaşmaya başlıyor! Yıldızlar doğuyor! Bunlardan en az birinin

çevresinde oluşmuş diskin içinde yine dalgaların yolculuğuna göre kısa bir sürede gezegenler oluşuyor; oluşumlarındaki şiddetli çarpışmaların etkisiyle sıcaklar. Ama zaman çok şeyi soğutabiliyor. Dalgalar her yönde binlerce gökadayı çöl rüzgârının kumulları geçtiği gibi geçerken, gezegenler soğuyor ve en az birinde, yaşam ortaya çıkıyor. Ancak şartlar zor, gelişme yavaş... Karmaşık bir ekosistem oluşana kadar dalgalar yine gökada aralıklarının binlerce katı mesafeyi geçiyorlar; geldikleri uzun yoldan dolayı zayıflamalarına rağmen hâlâ sıradan bir yıldızın komşu yıldızdan görünen ışığından çok daha parlaklar, o kadar büyük bir enerjiyle çıkmışlardı yola. Gezegende yaşamın hızlanan gelişimi, dört-beş kez felaketlerle sekteye uğruyor. Ancak yaşam, sıkı sıkıya sarılıyor kendine, her darbeden sonra tekrar ayağa kalkıyor. Dalgaların yine binlerce gökada aralığı geçtiği uzun bir dönemden sonra, dalganın küresel cephesi gezegenin olduğu gökadaya yaklaşırken, gezegen ekosisteminin ürettiği en büyük hareketli canlıları da içeren aile, bir göktaşı çarpması sonucu yok oluyor ve onların yerine başka bir aile gelişmeye başlıyor. Bu yeni ailenin içinden -gezegenin tarihinde ilk kez- akıllı bir tür çıktığında, dalgalar sarmal gökadanın yıldızları arasında ilerlemeye başlamış oluyor. Sonraki süre içinde bu tür, gezegenin hâkimiyeti için önce diğer türlerle, sonra kendi içinde savaşıyor. Nihayet evrenin kurallarını sistematik biçimde sorgulamaya başlıyor. Kozmik ölçekte göz açıp kapayıncaya kadar geçen bir sürede, dalgaların bir gökadanın içinden geçiş süresinin bile 20-25'te birinde bu tür, muhteşem eserlere ve insafsız trajedilere imza atıyor; fiziksel bir uygarlık geliştirip, atomun sırlarını çözüyor, evreni daha iyi anlamak için teleskoplar yapıyor; ve tam bu sırada dalgalar gezegene varıyor ve bu türün astronomları, dalgaların çok çok çok çok küçük bir parçasını teleskoplarıyla yakalıyor... Dalga cephesi ise başka yıldızlara, başka gökadalara, belki başka astronomlara doğru, mesajını taşıyarak devam ediyor.

- *Off ooffff... Yani bu süpernovaların ışığı, Güneş Sistemi'nin yaşından daha uzun bir süredir yolda mı diyorsunuz?*

- Evet, öyle.

- *Ve bu kadar uzaktan görebileceğimiz kadar şiddetli patlamalar... Müthiş...*

- İşte bunlar sayesinde evrenin milyarlarca yıl geçmişi hakkında bazı bilgiler edinebiliyoruz. Ayrıca ışık şiddetinin artıp azalma süreleri, tayftaki çizgiler (frekanslar), yakında gözlemlediğimiz Ia tipi süpernovalardan, uzakta ve geçmişte olmalarının getirdiklerinin haricinde değişiklik göstermiyor. Bu aynı zamanda bize, fizik yasalarının zamanla da değişmediğini teyit ediyor...

- *Ama ne tesadüf... Milyarlarca yıllık yolculuktan sonra ışık bize tam da onu algılayabilecek güçlü teleskopları yaptığımız sırada ulaşıyor... deMEyeceğim.*

- Deme zaten[131]...

131)Belli bir süpernova için, örneğin önümüzdeki iki yıl içinde dünyadan gözlenme olasılığı çok küçük tabii; ışığının ya gelmemiş ya da geçip gitmiş olması çok daha olası. Ancak gözlenen hacminde milyarlarca gökada var, her birinde ortalama 10 yılda bir böyle bir patlama olduğu için, olasılıklar toplanıyor ve gözlemlenebilir rakamlara ulaşıyor.

- *Hız ve mesafe belirlenmesi konusunda "tam olarak böyle değil" derken ne demek istediniz?*

- Bu ışığın yolculuğu sırasında evren hatırı sayılır oranda genleştiğinden, "mesafe"den ve "hız"dan ne kastettiğimiz bulanıklaşıyor; dolayısıyla Hubble yasasını bir anlamda yeniden yorumlamak gerekiyor. Neyin bulanık olmadığını fotonların hareket denklemini (ışıksal jeodezikleri - Soru 37'nin sonlarında söz etmiştik) inceleyince buluyoruz: Kırmızıya kayma faktörü, yani tayftaki frekansların kaç misli küçüldüğü, bize evrenin bu sürede kaç misli genleştiğini veriyor; hem de açık, kapalı ya da düz olduğuna bakmaksızın.

- *Yani frekanslar 2,2 misli düşük gözleniyorsa, bu o süpernovanın, evrenin 2,2 misli daha küçük olduğu zamanda patladığı anlamına mı geliyor?*

- Evrendeki uzunlukların tabii, hacimlerin değil... Daha matematiksel ifadeyle ***a***'nın. Ancak bu bize patlamanın ne kadar uzakta -nasıl bir mesafe ölçüsü kullanırsak kullanalım- ya da ne kadar geçmişte olduğunu doğrudan söylemiyor. Bunları çıkarabilmek için evrenin genleşme tarihini, yani ***a(t)*** fonksiyonunu bilmek gerekiyor. Kullanabileceğimiz en basit mesafe ölçüsü ise, bu süpernovaların ışık şiddeti; ne kadar uzaksa o kadar zayıf...

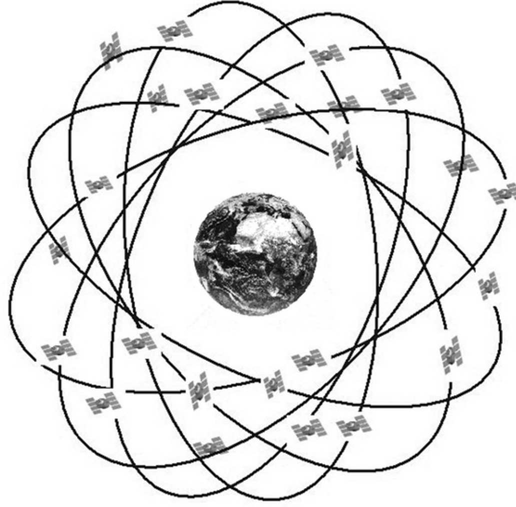
- *O zaman ölçtüğümüz şey, kırmızıya kaymanın fonksiyonu olarak ışık şiddeti...*

- Evet, Hubble yasasını artık bu şekilde düşünüyoruz. Aslında, ışık şiddetini basit bir işlemle bir mesafe ölçüsüne dönüştürmek de mümkün.

Şimdi, diyelim ki elimizde bir evren modeli var. Yani ***a(t)*** fonksiyonu —

- *Nasıl buluyoruz modeli? Yani a*(*t*) *fonksiyonunu?*

- Genelde, evrenin içinde ne olduğuyla ilgili bir bilgi



Şekil 63. GPS uyduları.

ya da varsayımla başlıyorsun. Bu da bir basınç-yoğunluk ilişkisi şeklinde ifade ediliyor; örneğin daha önce konuştuğumuz (Soru 42) gibi evrende maddenin ya da ışınımın baskın olması varsayımları gibi. Bir de evrenin açık mı kapalı mı düz mü olduğunu[132] seçince, Einstein denklemleri çözülüp[133] ***a(t)*** fonksiyonu (belki bir parametre içererek) bulunabiliyor.

132)Yani matematiksel ayrıntı dipnotlarındaki ***k*** değerini…

133)Matematiksel ayrıntı isteyenler için örnek: Bu sorunun başlarında söyleğimiz gibi, $p = 0$ (madde-baskın evren) için $a^3\rho$ sabittir. Düz bir model için de $k = 0$ alalım. Bu durumda birinci denklem, - olur;

burada hızı v yerine, a'nın zamana göre türevi ile gösterdik, C_1 de bir sabit. Denklem bize, a'nın türevinin - ile orantılı olduğunu

söylüyor, bunun da çözümü, *a*'nın $t^{2/3}$ ile orantılı olmasıdır. Yani düz madde-baskın evren için $a(t) = c_1 t^{2/3}$ geçerlidir.

- *Peki sonra?*

- $a(t)$ fonksiyonunu biliyorsan, ışığın evrenin içinde hareketini de çözebilirsin. Yani filan zamanda patlayan, standart güçte ışıyan bir süpernovanın ışığının, falan zamana geldiğinde evrendeki durağan gözlemciler tarafından hem ne kadar kırmızıya kaymış olarak, hem de ne parlaklıkta gözlemleneceğini hesaplayabilirsin.

- *Dolayısıyla, hangi kırmızıya kayma için hangi parlaklığın gözlemlenmesi gerektiğini de bulabilirim.*

- Gözlem de senin bulduğun gibi çıkarsa, modelinin gerçek evrene karşılık geliyor olma olasılığı artmış; senin bulduğun gibi çıkmazsa, modelinin gerçek evrene karşılık gelmediği ispatlanmış (yani modelin yanlışlanmış) olur. İşte 2000'e doğru bu süpernova gözlemleri, madde-baskın modellerin hangilerinin (açık mı, kapalı mı, düz mü; açık ya da kapalıysa yoğunluk, kritik yoğunluğun ne kadarı?) doğru ya da yanlış olduğunu anlamak, yani dolaylı yoldan karanlık madde yoğunluğunu da belirlemek amacıyla yapıldı.

Sonuç tam bir şoktu: Gözlemler madde-baskın modellerin **hiçbirine** uymuyordu! Gözlenen parlaklıklar fazla düşüktü, sıfıra yakın yoğunluklu madde-baskın modelden, yani sıfır ivmeli modelden[134] bile düşük...

134)İsteyenler bunu, 186. sayfadaki 70. dipnottaki denklemlere $p = 0$ ve $\rho = 0$ koyarak kolayca görebilir.

Dolayısıyla bu gözlemler, evrenin genleşmesinin ivmeleniyor olması şeklinde yorumlandı. Şöyle ki: Belli bir kırmızıya kaymadaki parlaklık, sıfır ivmeli modelde beklediğimizden düşükse, evrenin o büyüklükte olma hali, beklediğimizden daha geçmişte demektir. (Şekil 60) Halbuki, tüm madde-baskın modellerde ivme negatiftir, yani genleşmenin yavaşlıyor olması beklenir; soru "Yavaşlaya yavaşlaya duracak mı?"dır. Hatta, astronomlar bir "yavaşlama parametresi" tanımlamışlardı, süpernova gözlemleriyle bu parametre ölçülecekti.

- *Süpernovalar geçmişte bir şekilde sistematik olarak daha az şiddetli patlıyor olmasın? Belki o yüzden beklediğimizden sönük görünüyorlardır...*

- Tabii ki bunun da sorgulanması gerekiyor. Ancak, astrofizikçiler Tip Ia süpernovaların patlama enerjilerinin evrenin yaşına bağlı

olmadığı konusunda kendilerine epey güveniyorlar. Ayrıca süpernovaların bağıl parlaklıklarının artış ve azalış süreleri, kırmızıya kaymış da olsa tayfta gözlenen ve belli elementleri işaret eden frekanslar, bunların bağıl şiddetleri vb. bu güveni artırıyor.

- *Peki ışık o kadar mesafeyi geçip bize gelirken düşündüğümüzden biraz farklı davranıyorsa? Belki bir şeyle etkileşip enerji kaybediyordur?*

- Evet, bir iddiada bulunmadan önce bütün alternatiflerin incelenip yanlışlanması, en azından neden bizim iddiamızdan daha az olası olduğunun açıklanması gerekiyor; Feynman'ın sözleriyle, bilim kendini kandırmamaya çalışmaktır.[135] Ancak, bu kadar uzak nesnelerin görüntülerinin teleskoplarda odaklanabilmesi bile, ışığın evrende hareket ederken doğrudan (pardon, jeodezikten) sapmadığını bir ölçüde gösterir.

135)"Science is a way of trying not to fool yourself."

- *O zaman evren madde-baskın değil... Işınım-baskın hiç değil... Peki ne var baskın?*

- İşte büyük soru bu... Madde çekiyor (o yüzden genleşmenin yavaşlaması bekleniyordu); bir de itici bir şey gerek. Hem de başka türlü gözlemleyemediğimiz bir şey—

- *Kozmolojik sabit öyle bir şey değil miydi? Hani Einstein'ın "hayatının en büyük hatası"*...

- Evet, ilk akla gelen oydu zaten. Eğer sonunda cevap gerçekten bu çıkarsa, kozmolojik sabit konusunda son gülen Einstein olacak… Eee, insan Einstein olunca, "hatalı" fikri bile sonradan önemli çıkabiliyor.

Ancak, matematiksel ayrıntıya girmeyeceğim ama, kozmolojik sabite başka türlü bakmak da mümkün: Basınç-yoğunluk ilişkisi $p = -\rho$, yani $\rho + p = 0$ olan bir akışkan olarak. Tabii şimdi doğal soru, başka hangi olası basınç-yoğunluk ilişkilerinin ivmelenen evren verebileceği. Bu sorunun cevabı da, $\rho + 3p$'nin negatif olması.

Sonuç, evren ivmeleniyorsa, şimdiki zamanda evrende p/ρ oranı -1/3'ten küçük bir akışkanın baskın olması gerektiği. Biz bunu göremiyoruz; üstelik basıncın negatif olması da bildiğimiz madde için pek olamayan bir şey. Onun için bu akışkana madde demeye dilimiz

pek varmıyor (zaten karanlık madde ismi alınmış), dolayısıyla **karanlık enerji** diyoruz.

- *Hani kozmolojik sabitti?*

- Kozmolojik sabittir demedim; kozmolojik sabit olabilir dedim. Karanlık enerji kavramı, kozmolojik sabitin genelleştirilmiş hali. *p/*ρ oranı -1/3'ten küçük her türlü olası akışkan, karanlık enerji sınıfına girer; kozmolojik sabit bu oranın -1 olması hali. Diğer değerlerinin de adları var: -1/3 ile -1 arasında sabit ise quiessence, -1/3 ile -1 arasında zaman ile değişirse quintessence, -1'in de altında olursa phantom vb.[136]

136)Quintessence, Latince "beşinci öz" demek; bu, karanlık enerjinin parçacık fiziğinin standart modelinin dışında olmasını vurgulayan bir espri. Aslında ilkönce benzer sebeplerle bir karanlık madde kategorisi için kullanılıyordu, ama sonradan karanlık enerjiye transfer oldu. Quiessence, sanırım ona benzetilmiş. Phantom, hayalet demek. Bu kategorilerin hiçbiri, diğerinden çok ağırlıklı değil; çoğu büyük olasılıkla bir müddet sonra yanlışlanıp, unutulacak; dolayısıyla hiçbiri Türkçe'ye çevirmek için emek vermeye değecek önemde değil.

- *Karanlık enerji, kozmolojik sabitten başka ne olabilir diyeceğim ama, karanlık maddenin bile ne olduğunu bilmediğimize göre...*

- Alan kuramcıları harıl harıl, ne tür alanlar karanlık enerji davranışı gösterebilir diye düşünüyorlar; ama hiçbir aday burada anlatacak kadar ayrıcalıklı gözükmüyor, kozmolojik sabit hariç.

- *Bütün bu "karanlık işler"e evrenin geleceği hakkında fikir yürütebilmek amacıyla girmiştik. Evrenin şu anda ivmelenerek genleşmesi, genleşmenin gelecekte durmayacağı anlamına mı geliyor?*

- Öyle gözüküyor. Çünkü karanlık enerjinin basınç-yoğunluk ilişkisi, onun evren genleştikçe öneminin artması anlamına geliyor; aynen maddenin evrende başta önemsiz olup, sonradan baskın hale gelmesi gibi. *p/*ρ oranı maddeninkinden küçük (negatif) olduğu için, yoğunluğu maddeden daha yavaş düşüyor. Bu da geçmişte maddeden daha az önemli olması demek, gelecekte ise daha önemli. Dolayısıyla genleşme devam edecek, hem de hızlanarak devam edecek gibi. Üstelik bu evrenin şeklinden bağımsız.

- *Ha evet, o ne oldu? Evrenin şekli, yani açık/kapalı/düz olma konusu?*

- Karanlık enerji kavramı, evrenin şekli ile kaderi arasındaki ilişkiyi bozuyor, ama şekli ile yoğunluk/kritik yoğunluk oranı arasındaki ilişkiyi bozmuyor. Yani evren hem kapalı olup, hem de sonsuza kadar genleşebilir. (İngilizce'deki kelime oyunu artık geçerli değil.)

Ancak, karanlık enerjinin yoğunluğunu ölçmemiz mümkün değil, çünkü göremiyoruz. Ama, evrenin şeklini doğrudan ölçmenin bir yolunu bulduk.

- *Nasıl?*

- Evrenin eğriliği pozitif ise, paralel başlayan ışınlar birbirine yaklaşır, negatif ise uzaklaşır, sıfır ise (evren düz ise) paralel kalır. Dolayısıyla uzaktaki bir cismin iki ucundan gelen ışınların yaptığı açı, yani cismin gözlenen açısal büyüklüğü, evrenin geometrisine bağlıdır. Pozitif eğrilikteki (kapalı) evrende cismin büyük bir açı, negatif eğrilikteki (açık) evrende küçük bir açı kapsadığını görürüz. (Şekil 62) Şimdi ihtiyacımız olan öyle bir uzunluk ki, hem bizden kozmolojik mesafelerde olsun (ki açı düz evren sonucundan ölçülebilecek farklılık göstersin), buna rağmen görülebilir olsun ve düz evren için görmemiz gereken açıyı hesaplayabilelim.

- *Böyle bir şey bulmak zor görünüyor... Hem kozmolojik uzaklıklarda olacak, hem de hassas olarak ölçülebilir açısal büyüklüğe sahip olacak. O mesafelerde neredeyse gökadalar bile nokta gibi görünüyor...*

- Doğru ama, böyle bir uzunluk bulunabiliyor. Hem de görebildiğimiz, ışığın bize geldiği en uzak yerde…

- *Işığın bize geldiği en uzak yer... Bu kozmik ardalan ışınımı değil mi? Ama o izotropikti...*

- Evet, kozmik ardalan ışınımından bahsediyoruz. Onun izotropikliği, evrenin homojen/türdeş olmasının bir sonucu. Ama evren tam olarak homojen olamaz; olsaydı evrende hiçbir yapı, yani gökada, yıldız, gezegen vs. olmazdı. Çünkü etrafından daha yoğun bölgeler olmalı ki, etrafını kendine çekip, yoğunluğunu daha da arttırsın, böylece bir şeyler oluşsun. Böyle olmasa, biz de olmazdık.

Bu yoğunluk sapmaları, ardalan ışınımına sıcaklıktaki küçük sapmalar şeklinde yansıyor. Bir diğer deyişle, ardalan ışınımının sıcaklık haritası, bize erken evren plazmasının nötr atomlu gaza dönüşme anındaki yoğunluk haritasını gösteriyor.

- *Peki, kozmik ardalan ışınımının sıcaklığı yöne göre ne kadar fark ediyor?*

- Bu sıcaklığa yaklaşık 3 Kelvin demiştik. Daha hassas ölçülünce (ve dünyanın hareketinden gelen Doppler olayı çıkartılınca), farklı

yönlerdeki sıcaklığın ilk dört hanesi aynı; beşinci hanede fark etmeye başlıyor. Ancak, bizi ilgilendiren, bu farkların yönlere göre dağılımı—

- *Neden?*

- Çünkü bu yoğunluk farkları, erken evren plazmasındaki dalgaların sonucu. Bir bölge yoğunlaştığı zaman, plazmadaki basınç artıyor, hatta çekimden hızlı artıyor ve bölgeyi tekrar genleştiriyor. Fazla genleşip, yoğunluğu fazla düşürürse de, basınç fazla düşüyor, çekim bölgeyi tekrar büzüştürüyor. Bölge, bir yayın sıkışınca ortaya doğru ittiği, uzayınca ortaya doğru çektiği bir kütle gibi bu iki durum arasında gidip geliyor. Bu salınımlar, plazmada durağan dalgalar oluşturuyor ve biz bunların baskın dalga boyunu hesaplayabiliyoruz. İşte bu dalga boyu bizim evrenin eğriliğini ölçmek için kullanabileceğimiz uzunluk.

- *Herhalde bir sürü dalga boyu vardır. Birbirine karışmıyor mu?*

- Ayırmanın matematiksel yöntemleri var. Müzik eğitimine sahip bir kulak, onlarca enstrümanın çaldığı bir orkestrayı dinlerken, istediği zaman örneğin yalnız kemanlara yoğunlaşıp, bir anlamda onları diğerlerinden ayıramıyor mu?

- *Peki, sonuç?*

- Evren düz ya da düze çok yakın.

Bu, evrenin toplam yoğunluğunun kritik yoğunluğa eşit olmasını gerektiriyor, aynen şişen evren kuramının söylediği gibi. Tabii bu bize madde (normal artı karanlık) ve karanlık enerjinin yoğunluklarının toplamını yaklaşık olarak veriyor.

Öte yandan, süpernova gözlemleri ise bu yoğunlukların farklarını yaklaşık olarak veriyor. Çünkü bu gözlemler, dolaylı olarak ivmeyi ölçüyorlar, madde ve karanlık enerjinin ivmeye etkileri birbirlerine karşıt, o yüzden fark önemli.

- *İki büyüklüğün hem toplamını, hem farkını bilirsek; bu büyüklükleri ayrı ayrı hesaplayabiliriz.*

- Böyle yapılıyor zaten ve karanlık enerji kritik yoğunluğun yaklaşık yüzde 70'i, madde ise yaklaşık yüzde 30'u olarak bulunuyor. Normal madde de yüzde 3-5 olarak ölçüldüğüne göre, evrendeki maddenin yüzde 25-27'sinin karanlık madde olduğu sonucuna varılıyor.

- *Yani karanlık madde problemi yüzde 90'lardan yüzde 20'lere inmiş oluyor, ama karanlık enerji probleminin ortaya çıkması karşılığında...*

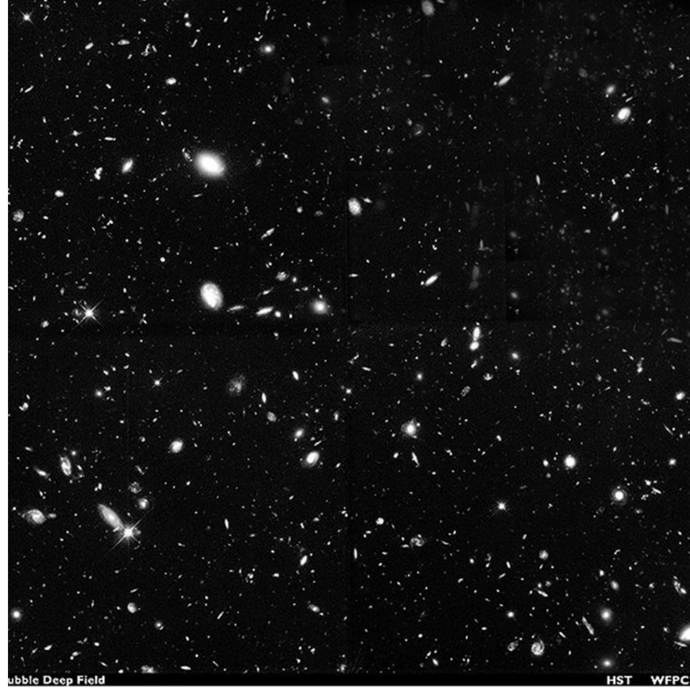
- Bu durumda da, evren sonsuza kadar, gittikçe hızlanarak genleşecek gibi görünüyor. Şekli ise hâlâ belirsiz, kapalı da olabilir, açık da…

- Süre sonsuz olduğuna göre, o zaman tüm yıldızlar sonunda sönecek evrende, değil mi? Sonuçta kullanabilecekleri "nükleer yakıt" sınırlı...

- Doğru. Yüksek kütleli yıldızlar kara deliklere, orta grup nötron yıldızlarına, düşük kütleliler beyaz cücelere dönüşecek. Bütün bu dönüşümlerde, yıldızın kütlesinin önemli bir kısmı uzaya saçılıyor, ama bunlardan da yeni yıldızlar oluşuyor. En uzun ömürlü yıldızlar kütleleri en düşük olanlar, onların da ömürleri 10^{14} yıl mertebesinde. Evrenin şu anki yaşının 10^{10} yıl mertebesinde olduğunu hatırlatayım.

- *Sonra ne oluyor? Örneğin, kara delikler buldukları zaman etraflarındaki maddeleri yutarak gittikçe büyürler herhalde. Hatta çarpışma olasılıkları düşük olmasına rağmen, sonuçta sonsuz zaman var, çarpışıp birleşerek de büyürler, değil mi?*

- Aslında madde yutarak büyümek, kara delikleri değiştiren tek şey değil. 1974'de Hawking, kara deliklerin o kadar da kara olmadıklarını buldu: Kuantum etkileri yüzünden kara delikler ışınım yayarlar. Dolayısıyla etrafında yutacak madde olmayan bir kara delik bu ışıma ile kütle kaybeder, yani küçülür. Genel durumda ise bu iki süreç birden işler, yani madde yutmak kara deliği büyütür, Hawking ışınımı küçültür.



Şekil 64. Hubble Deep Field (derin alan).
Kol mesafesinde tutulan bir topluiğne başının gökyüzünde kapladığı kadar alanın, yüzlerce saatlik pozlama ile çekilmiş fotoğrafı. Binlerce gökada görülüyor; tabii her biri on milyarlarca yıldız barındırıyor.

- *Bu Hawking ışınımını nasıl anlayabilirim?*

- Kuantum alan kuramı, bize boşluğun boş olmadığını öğretir. Madde-antimadde parçacık çiftleri, sürekli olarak oluşmakta ve yok olmaktadır, boşluk eskilerin zannettiği gibi bir hiçlik değildir, yeterince küçük ölçekte bakabilirsen köpüren fırtınalı bir deniz gibidir—

- *Ama enerji korunumu—*

- … Heisenberg belirsizlik ilkesine göre Δt süresi için ΔE miktarı kadar ihlâl edilebilir, $\Delta t \Delta E \leq h/2\pi$ olmak şartıyla. Boşluğun bu özelliğinin deneysel sonucu da var, elektronun bu parçacıklar ile etkileşimi, hidrojen atomunun tayfında kendini **Lamb kayması** olarak gösteriyor.

Aynı şey eğri uzayda da geçerlidir. Şimdi, eğer böyle bir çift, bir kara deliğin olay ufku yakınında oluşursa, bunlardan biri olay ufkunu geçip kara delik tarafından yutulabilir. Bu durumda diğeri de genellikle onu takip edip, olay ufkunun içinde onunla buluşacaktır.

Ancak, oluştuğu momentum yön ve büyüklüğüne bağlı olarak, kara delikten uzaklaşıp, sonsuza ulaşma olasılığı da vardır. Bu durumda bu parçacığın enerjisi pozitiftir, bu da yutulanın enerjisinin negatif olması anlamına gelir, çünkü enerji korunumu ancak çok kısa bir süre için geçici olarak ihlal edilmiştir. Negatif enerji yutan kara deliğin de tabii enerjisi, yani kütlesi azalır.

Hawking, örneğin fotonların sonsuza ulaşma olasılığını enerjileri cinsinden hesapladı. Enerji frekansa; olasılık da o frekanstaki akı miktarına orantılı olduğuna göre; bu tayfın hesaplanmış olduğu anlamına gelir. Hawking, tayfın **termal** olduğunu buldu. **Kara deliğin sıcaklık parametresi de, kütlesi ile ters orantılıydı.**

- *Işınım derken yalnızca fotonlar kastedilmiyor galiba...*

- Hayır, her türlü parçacık mümkün. Ancak, sıcaklığı düşük olan kara delikler, yalnızca kütlesiz parçacıklar ile ışıyacaktır, yani fotonlar, nötrinolar ve varsa gravitonlar ile. Çünkü kütleli parçacığın oluşması daha fazla enerji ister.

Hawking ışınımının -ki bazen **kara delik buharlaşması** da denir- özellikleri ile devam edelim: Kara delik ışıdıkça kütlesi azalıyor, ama bu sıcaklığının artması anlamına geliyor. Bu, bir bakıma çok değişik bir ışınım: Normalde ışıyan bir cisim soğur; bu ısınıyor!

Termal ışınım için ışıma şiddetinin T^4 ile orantılı olduğu bilinir, bu kara delik için $1/M^4$ ile orantılı olmak demektir. Kara deliğin etkin ışıma alanı, olay ufkunun alanı ile orantılıdır, bu da M^2 orantısı demektir; yani toplam güç $1/M^2$ ile orantılı çıkar. **Yani kara deliğin kütlesi azaldıkça, yalnız sıcaklığı değil, ışıma gücü de artar.** Kütle sıfıra yaklaştığında, yani sürecin sonunda formülümüze göre güç sonsuza gidiyor, buna da **kara delik patlaması** deniyor.

- *Yani uzun vadede kara delikler buharlaşıp temel parçacıklara dönüşecekler, öyle mi?*

- Çok uzun vadede. Kara deliğin sıcaklığının kütle ile ters orantılı olduğunu hatırla. Yıldızlardan oluşan kara deliklerin sıcaklığı çok düşük, 10^{-7} Kelvin mertebesinde. Ancak Ay kadar kütleli kara deliklerin sıcaklığı 1 Kelvin mertebesinde, daha düşük kütleli kara deliklerin sıcaklıkları daha yüksek olur.

- *İlksel kara delikler!*

- Evet, Hawking ışınımı, 45. Sorunun sonunda bahsettiğimiz, ilksel kara deliklerin büyüyüp kozmolojik ölçeğe ulaşmaları sorununu çözer. Büyük olasılıkla bunlar düşük kütle ile oluşup buharlaşacaktır, ya da en azından eskiden düşünüldüğü gibi büyümeyecektir… Hawking ışınımının çözdüğü ikinci sorun, kara deliklerin ilk bakışta termodinamiğin ikinci yasasını ihlal ediyor gibi görünmeleri.

- *Nasıl ihlal ediyor gibi görünüyorlardı ki?*

Termodinamiğin ikinci yasası, kapalı bir sistemde **entropi**nin azalamayacağını söyler. Bir sistemin entropisi aynı zamanda düzensizliğin, karmaşıklığın ölçüsüdür. Bir kara delik son derece basittir -hani Soru 47'de saçsızlık teoremi vardı. Halbuki bir yıldız böyle değildir, entropisi yüksektir. Bu yüzden yıldızların çöküp kara delik oluşturması ikinci yasayı ihlal ediyor gibi görünüyordu. Ama şimdi kara deliklerin bir sıcaklığı varsa, termodinamiğin birinci yasası, entropileri de olmasını gerektirir. Bu yüzden olay ufkunun yüzölçümüne orantılı yeni bir entropi tanımlanır ve toplam entropiye bakılınca, termodinamiğin ikinci yasası sağlanır.

- *Peki, evrendeki kara delikler ne kadar sürede yok olacaklar?*

- Aslında şu anda, birkaç güneş kütleli bir kara delik, etrafında hiç madde kalmamış olsa dahi, Hawking ışınımı yüzünden küçülüyor değildir; çünkü madde bulamasa dahi üzerine düşen kozmik ardalan fotonlarını yutar. Ardalan ışınımının sıcaklığı Hawking ışınımından yüksek olduğu için, onun büyütme etkisi üstün gelir. Ancak, evren genleştikçe ardalan ışınımının sıcaklığı düşecek ve bir noktada Hawking ışınımının etkisi üstün gelmeye başlayacaktır.

- *Bu ne kadar süre sonra olacak?*

- Ardalan sıcaklığı ***a(t)*** ile ters orantılı olduğuna göre, evrenin yaklaşık 10^7, yani on milyon misli genleşmesi gerekir. Evren de artık hızlanarak genleşeceğine göre, bu 10^{17} yıldan kısa sürer. Tam olarak ne kadar süreceği, gelecekteki ***a(t)*** fonksiyonunun şekline bağlı, onu da karanlık enerjinin türü belirler.

- *Baskın hale geldikten sonra buharlaşma süreci ne kadar sürüyor?*

- Bu süre, kara deliğin kütlesinin küpü ile orantılı çıkıyor. Güneş kütleli bir kara delik için 10^{67} yıl mertebesinde bir süre buluyoruz.

Tabii, süper yüksek kütleliler için bu süre 10^{85-90} yıl mertebesine çıkıyor.

- Yahu bu "bilimsel notasyon" çok faydalı, ama bazen de sinir oluyorum. Yazma kolaylığı rakamların büyüklüğünü hissetmemizi engelleyebiliyor. 10^{90} yazmak ne kadar kolay. Halbuki bu o kadar uzun bir süre ki...Yaşamımızın her bir saniyesini bir asır yapsak, 10^{11} yıl filan oluyor. Yaşamınızın her bir saniyesini evrenin şimdiki yaşı yapsak, 10^{19} yıl mertebesine ulaşıyoruz. Sonra bunun her bir saniyesini evrenin şimdiki yaşı yapsak, 10^{37} yıl mertebesine ulaşıyoruz. Tekrar aynı işlem, 10^{55} yıl. Bir daha, 10^{73} yıl. Bir kez daha, 10^{91} yıl...

- Evet, insan bazen bu daha zor yazılmalı diyor, değil mi? Her neyse, aslında kara delik buharlaşmasının son aşamaları tartışmalı. Çünkü kara deliğin kütlesi Planck kütlesi dediğimiz küçük (10^{-5} g mertebesinde) bir değere yaklaştığında, genel görelilik kuantum ilkeleriyle çelişmeye başladığından, o ölçekte doğru olamayacağını düşünüyoruz. Zaten bu değere gelmeden biraz önce, Hawking hesabının bir varsayımı, kara delik uzay-zamanının durağan alınabileceği, geçersiz hale geliyor. Bu da kara deliğin tamamen yok olmayıp, geride Planck kütlesi mertebesinde bir kalıntı bırakması olasılığını gündeme getiriyor. Bilmiyoruz…

- Öyle olsa ne değişir?

- Çok bir şey değişmez gibi görünüyor. Buharlaşmadan sonra temel parçacıklara ek olarak, bir de bu kalıntılar kalır geride…

- Hangi temel parçacıklar?

- Her türlü parçacık mümkün demiştik… Ancak, tabii ki kararsız olanlar bozunacaktır. Bu, çıkan ışınımın eninde sonunda fotonlar, nötrinolar ve antinötrinolara dönüşmesi demek.

- Neden hem nötrinolar, hem antinötrinolar?

- Olay ufku yakınında oluşan parçacık çiftleri için, madde ve antimadde parçacıklarının sonsuza ulaşma olasılıkları eşit de ondan. Dolayısıyla, ortalamada Hawking ışınımının eşit miktarda madde ve antimadde parçacıkları içermesini bekleriz. Bunlar da buluştukları

zaman birbirlerini yok edip, fotonlara ya da nötrino-antinötrino çiftlerine dönüşürler.

- Nötrino ve antinötrinolar neden birbirlerini yok etmiyorlar?

- Etkileştikleri zaman ederler aslında. Ama etkileşimleri çok zayıf, onun için evrende serbestçe dolaşıyorlar.

- Antifotonlar niye yok?

- Fotonun antiparçacığı yine fotondur; aslında foton, bu özelliğe sahip tek parçacıktır.

- Ama o zaman bir yıldızın kara deliğe dönüşüp de sonra bu kara deliğin buharlaşması, madde'nin (yıldız) eşit miktarlarda madde ve antimadde'ye (fotonlar ve nötrino-antinötrino çiftleri) dönüşmesi demek… Bu bir korunum yasasına aykırı değil mi?

- Baryon sayısı korunumuna aykırı. Şöyle ki, yıldızın, içerdiği proton ve nötronlardan dolayı, epey büyük bir pozitif baryon sayısı vardır; kütlenin sonunda dönüşeceği Hawking ışınımının net baryon sayısı ise sıfır ya da ona çok yakın. 27. Soruda baryon sayısının elektromanyetik, zayıf ve güçlü etkileşimlerin tek tek her biri için korunduğunu konuşmuştuk. Ancak, Hawking ışınımının bu özelliği, baryon sayısının kuantum genelçekiminde korunmayacağı yönünde önemli bir ipucu.

- Peki, kara delikleri konuştuk. Ömürlerini kara delik olarak bitirmeyen yıldızlar? Nötron yıldızları, beyaz cüceler?

- Yalnızca onlar değil, kahverengi cüceler de var. Çok uzun bir süre yıldızlararası boşlukta gaz ve toz olacak; gezegenler de var. Bunların kaderleri biraz, baryon sayısının genelçekim haricindeki etkileşimlerde korunup korunmadığına bağlı.

Şişen evren kuramından bahsederken konuştuğumuz büyük birleştirme kuramları da, baryon sayısının korunmayacağını öngörür. Bu durumda protonlar kararsız olacak ve bildiğimiz madde giderek bozunacak. Protonlar eninde sonunda pozitronlara dönüşecek, çünkü elektrik yükü korunuyor ve en düşük kütleli yüklü parçacık o. Bunlar da elektronlarla buluştuklarında birer çift fotona dönüşecekler; evren fotonlar, nötrinolar, olası kara delik kalıntıları ve kararlı karanlık madde parçacıklarının oluşturduğu, sıcaklığı sıfır yakınında bir gazla dolu hale gelecek. Buzun zaferi…

- Bu olayların zaman ölçeği ne?

- Büyük birleştirme kuramlarının en basit versiyonlarında protonun yarı ömrü 10^{31} yıl kadar tahmin ediliyordu. Ancak deneyler bunu doğrulamadı—

- *Nasıl yani? Birisi karşısına bir proton alıp 10^{31} yıl beklemiş olamaz...*

- Bu gerekmez ki. 10^{31} proton alıp bir yıl beklesen de olur. Sonuçta deneylerin (2010 itibarıyla) son verilerine göre, protonun yarı ömrü en az 10^{34} yıl. Tabii bu, sonsuz da olabilir demek; o zaman proton kararlı deriz. Ama diyelim ki 10^{40} yıl. Bütün bu cisimler, yani kara delik olmayanlar, yaklaşık 10^{45} yılda bozunur, yani son kara deliğin buharlaşmasının bitmesinden çok çok önce. Bu sürede proton bozunmasının verdiği enerji, nötron yıldızı ya da beyaz cücelerin sıcaklıklarının mutlak sıfıra fazla yaklaşmasını engeller, kahverengi cüceler ve gezegenler için etkisi daha az olur.

- *Ya büyük birleştirme kuramları yanlışsa, yani protonlar kararlıysa?*

- O zaman nötron yıldızları, beyaz cüceler, kahverengi cüceler ve gezegenler yalnızca sonsuza kadar soğurlar. Ancak, az sonra bahsedeceğim nadir birleşmelerle çok az bir kısmı sınıf değiştirip, bir süre için hayatlarına renk katabilirler. Çok çok daha uzun, 10^{1500} yıl mertebesinde zaman ölçeklerinde çekirdeklerin kuantum mekaniksel geçişlerle birleşerek ya da parçalanarak demire dönüşeceği, daha da uzun ölçeklerde nötron yıldızlarına ve kara deliklere kuantum geçişleri olabileceği yönünde spekülasyonlar da vardır.

Protonlar kararlıysa da, değilse de, yıldızların sönmesinden sonraki evrede de arada bir bazı ilginç şeyler olabilir: Gökadalar içindeki yıldızlar uzaktan da olsa etkileşip enerji değiştokuşu yaparken, arada birisi çok hızlanabilir. Bu yıldız gökadalararası boşluğa kaçar, ama bu olay kalanları daha da birbirine yaklaştırır, çünkü yüksek enerjili bir birey kaybedildiğinden, grubun ortalama enerjisi azalmıştır. Gökadalar yıldızlarının çoğunu bu şekilde kaybedebilir, kalanların da çarpışma olasılıkları biraz yükselir.

Gerek gökadalar içinde, gerekse dışarı atılmış olanlar arasında, bir nötron yıldızı bir başka nötron yıldızıyla, bir beyaz cüceyle, hatta bir kahverengi cüceyle çarpışırsa, onunla birleşip bir kara deliğe

dönüşebilir. Bir beyaz cüce bir başka beyaz ya da kahverengi cüceyle çarpışırsa Tip I'e benzer bir süpernova oluşturarak dağılabilir ya da Tip II'ye benzer bir süpernova oluşturarak bir nötron yıldızı veya kara deliğe dönüşebilir. İki kahverengi cüce çarpışırsa artık yıldız oluşumu bitmiş olan evrende yeni bir yıldız oluşabilir!

- *Biz ne olacağız? Yani dünya?*

- "Yalnızca" altı milyar yıl sonra, Güneş kızıl dev evresine geçecek. Bu aşamada Güneş, Dünya'yı yutacak kadar şişebilir ya da eğer -bu aşamada bazı yıldızların yaptığı gibi- şiddetli Güneş rüzgârıyla madde kaybederse, Dünya'nın yörüngesi Güneş'ten uzaklaşıp, yutulmaktan kurtulabilir. Dünya yutulmasa bile, kızıl dev evresinde artan ışıma gücü yüzünden çok ısınacak; büyük olasılıkla okyanusları buharlaştıracak kadar. Olası güçlü Güneş rüzgârlarının Dünya'ya ne yapacağı da cabası.

- *Eğer insanlık o zamana kadar devam ederse, kaçacak ya da Dünya'yı koruyacak teknolojiyi de geliştirir diye düşünüyorum...*

- Belki de… Diyelim ki kaçtık… Birkaç yüz milyon ya da en fazla bir milyar yıl daha sonra Güneş bir beyaz cüceye dönüştüğünde ise, dolunay ile bulutlu bir gün arası bir aydınlık olur gündüzleri… Daha uzun vadesi, biraz evvel bahsettiğim gibi proton bozunmasının olup olmamasına bağlı.

Yani evren buz ile bitecek gibi görünüyor, ama dünya ateş ile bitebilir…

49-Göreliliğin günlük hayata bir etkisi var mı?

- *Göreliliği bu kadar konuştuk. Özel görelilik yüksek hızlarda, genel görelilik yüksek madde-enerji yoğunluğu olan bölgelerde ve yakınlarında önem kazanıyor. Peki günlük hayatımızda hiçbir konuda önemi yok mu?*

Aslında bir konu var: GPS, yani "Global Positioning System", yani Küresel Yer Belirleme Sistemi. Bu sistemin uyduları (Şekil 63'e bak), dünyanın her noktasından en az dört uydu görülebilecek yörüngelere yerleştirilmiştir. GPS alıcısı, yerini belirleyebilmek için farklı uydulara

olan mesafeleri kullanır. Bu mesafeleri belirlemek için ise, uyduların (elektromanyetik) sinyallerinin geliş sürelerine bakar.

Takdir edersin ki, bu çok duyarlı zaman ölçümü gerektirir. Uydular duyarlı atom saatleri ile donatılmıştır, alıcıların saatleri de onlarla ayarlanır. Ancak, uyduların saatleri ile yerdeki saatlerin zamanları, yavaş yavaş birbirlerinden sapar. Çünkü hem uydular dünyadaki araçlara göre epey yüksek hızlarda gitmektedirler, hem de yerden yüksektedirler—

- *Yani hem özel görelilik, hem genel görelilik etkileri var...*

- Evet, hem hızdan dolayı zaman genleşmesi, hem farklı yüksekliklerde çekimsel kırmızıya kayma olayından (Soru 34) hatırladığımız, zamanın farklı hızlarda geçmesi etkilerinin hesaba katılması gerekir. Eğer **bu etkiler hesaba katılmazsa birkaç saat içinde yer belirleme hataları onlarca kilometreye çıkarak** sistemi anlamsızlaştırırdı.

Günlük hayatımızla ilgili değil ama, Soru 38 ve 39'da bahsettiğimiz yıldız ışığı sapması ve Merkür'ün günberisinin hareketi testlerinden başka, 1960'lardan itibaren diğer gezegenlere gönderilen radar sinyallerinin gidiş-dönüş zamanlarının ölçülmesi şeklinde, Güneş Sistemi içinde uzayın eğriliği sınanmış ve sonuçlar genel görelilik ile uyumlu çıkmıştır.

50-Bu bilgiler ne işime yarayacak?

- *Gerek özel göreliliğin, gerekse genel göreliliğin günlük hayatımızda başka bir uygulaması yok galiba. Konuştuğumuz şeyler çok ilgi çekiciydi ama, bir işime yarayacak mı? Kara deliklerin Penrose diyagramını bilmenin bana ne faydası olur?*

- Dördüncü Murat'a bir adam gelmiş. Hüner göstereceğim demiş. Yere bir çuvaldız dikmiş. On adım ötede, elinde ardından ince bir iplik sarkan ince bir dikiş iğnesi ile durmuş. Gözlerini kısmış, birkaç kez atar gibi yaptıktan sonra, iğneyi çuvaldıza doğru fırlatmış. İğne,

peşinde ipliği de götürerek havada uçmuş ve çuvaldızın deliğinden geçmiş.

Hayret nidaları sustuktan sonra padişah hazinedarına dönmüş, “Verin şu kuluma 500 altın” demiş; sonra bostancıbaşına dönmüş, “Yıkın falakaya, vurun 500 değnek” diye emretmiş. Adamın gözleri büyümüş. “Padişahım,” demiş, “500 altını anladık da, 500 değnek ne oluyor?” Dördüncü Murat da demiş ki, “500 altın, böyle başka kimsenin başaramayacağı bir işi başardığın için. 500 değnek de, vaktini ve emeğini böyle faydasız bir işe harcadığın için.”

- *Haklı adam...*

- Öyle mi dersin? Birisinin 100 m’yi 9,58 sn’de koşmasının kime ne faydası var? Bir hikâye daha anlatayım; gerçi uydurma olduğu iddia ediliyor, ama öyle de olsa, güzel bir hikâye: Elektromanyetizmanın kurucularından Faraday, basit bazı deneyleri İngiltere’de sosyete partilerinde gösterirken—

- *Neden oralarda gösteriyormuş?*

- Eskiden bilimi organize etmek ve desteklemekle görevli, TÜBİTAK gibi devlet kurumları yokmuş ki. Bilimciler araştırmaları için gerekli parayı ya kendi ceplerinden karşılarlarmış -ki bu yüzden bilimcilerin anormal derecede yüksek bir oranı aristokratlardan çıkmıştır-, ya da krallardan, beylerden, zengin kişilerden destek isterlermiş. Aynen sanatçılar gibi, Haydn’ın yaşamının önemli bir kısmını Esterházy ailesinin himayesinde geçirmesi gibi.

Her neyse, deneylerini gösterirken yaşlı bir leydi, “Eğlenceli gözüküyor ama, ne işe yarayacak ki bunlar?” diye sormuş. Faraday, kısa bir duraklamadan sonra, bir soruyla karşılık vermiş: “Lütfen söyler misiniz leydim, yeni doğmuş bir bebek ne işe yarar?”[137]

137)Aynı soruyu soran Başbakan’a verdiği yanıt: “Bilmiyorum efendim, ama pek yakında eksalanslarınızın hükümeti bunu vergilendirmenin bir yolunu bulur.”

- *O zamanlar sürekli yedirmemiz, altını değiştirmemiz, sakinleştirmemiz gereken o bebek; şimdi büyüdü, geceleri evlerimizi aydınlatıyor, çamaşırlarımızı, bulaşıklarımızı yıkıyor.*

- Bilimsel bilgi üretmede amaç, doğayı, evreni tanımak, onun işleyiş kurallarını anlamaktır; çoğu zaman bilimcinin dürtüsü, sadece meraktır. Sonuçta **bu** evrende yaşadığımıza göre, onu daha iyi anlamak mutlaka eninde sonunda bir işe yarayacaktır, ama bilimci bu

yararın (ya da kullanımın) ne olabileceğini çoğu zaman kestiremez. Maxwell bilgisayarı öngörebilir miydi?..

İşte bu yüzden bilimsel bilgiden fayda talep etmek yersiz ve gereksizdir. Çünkü zaten doğa ile ilgili faydasız bilgi diye bir şey yoktur. Uygulamadan en uzak olduğu düşünülen matematik dalı olan -ki matematik bilimden çok bir dil sayılabilir- sayı kuramının bile bugün kriptoloji, yani şifreleme alanında uygulamaları var… Faydalı-faydasız bilgi ayrımı yapmaya çalışmak, bilimin gelişimini kösteklemekten başka bir işe yaramaz.

- İnsanlar bazen eğitim sisteminden şikayet ederken, “Kurbağanın sindirim sistemini öğretiyorlar, ne işimize yarayacak?” derler...

- Bir kere “işe yarayacak bilgiyi öğretin” isteği, mantıksız zaten. Öğrencinin gelecekte işine yarayacak bilgilerin hangileri olacağının mutlak ayrımını şimdiki zamanda yapamayız ki. Eğer yapmaya kalkarsak insanları, “anne-babaları zamanında işe yarayan” bilgilerle donatmış oluruz.

- Kişinin gelecekte işine yarayacak bilgi şu anda mevcut bile olmayabilir...

- Doğru… Ayrıca, Ali Baykal’ın vurguladığı gibi, **kurbağanın sindirim sistemini merak edenler, bugün genetik bilimini geliştirmişlerdir...** Kurbağanın sindirim sistemi, bire bir işe yarayacak bilgi olmasa da, dolaylı olarak işe yarar. Doğada olan sindirim sistemlerinden bir tipin belirgin bir örneğidir. Doğada bir problem için (burada sindirim) farklı çözümlerin bulunabileceğinin bir gösterimidir.

Daha önemlisi, biyoloji biliminden tadımlık bir parçadır. Bir kültür lisesinin (yani mezunlarının üniversiteye devam edeceğini varsaydığımız bir lisenin) öğrencilerine her bilim disiplininden azar azar tattırmak gerekmez mi, hangisini sevebileceğine karar vermesi için? Herkesin tattığı her şeyi sevmesi gerekmez; belki severse biyolojik bilimler ya da tıp tarafından devam eder ileride, sevmezse sonradan uzak durur o konulardan. Ama lisede tatmazsa nereden bilecek?

Daha da önemlisi, bu ve benzeri bilimsel bilgiler doğru şekilde, yani “Ne biliyoruz?”dan çok “Bunu nasıl biliyoruz?”un üstünde durularak anlatılırsa, bilimsel bilginin nasıl edinildiği ve nasıl edinilMEdiğini anlatmak için araç olur. Bu önemlidir, çünkü modern yaşamımızda

ucu bilime dayanan çeşitli önemli sorunlar vardır ve demokratik toplumlarda çözümler için toplum bazı ortak kararlar vermek durumundadır. Küresel ısınma var mı, yok mu? Var ise insanlar mı yol açıyorlar? Nükleer santral gerekli midir? Ne kadar tehlikelidir? Ozon tabakası deliniyor mu? Ne yapmak gerek? Tarım ilaçları? Bitkisel büyüme hormonları? GDO'lar? Astroloji geçerli midir? Yoktan enerji var edilebilir mi? Mikrodalga fırın ya da cep telefonu kanser yapar mı?

- *Yapar mı?*

- Bilim bir cevaplar kümesi değil, bir cevap bulma yöntemidir. Benim yapar ya da yapmaz demem önemli değil, bu iddiamı nasıl desteklediğim önemli. "Yayıyor işte bir radyasyon, mutlaka zararlıdır" demek geçerli değil; Güneş ışığı da bir "radyasyon."[138] İddianın bu şeklinin geçerli olmadığını anlayacak kadar bilimin işleyişini bilmek gerek. Bir başka deyişle, kişilerin bireysel olarak yukarıda örneklediğim ve benzeri konularda karar verebilecek bilgiye sahip olmasını beklemiyoruz; tartışmanın taraflarının iddialarını daha sağlıklı değerlendirilebilmesinden bahsediyoruz. Örneğin, varlığı iddia edilen bir korelasyonun nedenselliği gösterip göstermediği ayrıca kontrol edilmiş mi?

138)Her bilimsel/teknolojik ya da öyle görünen şeyden korkma sendromunun bir parodisi için internetten "dihidrojen monoksit" ifadesini arayabilirsiniz. (Ya da İngilizce dihydrogen monoxide.)

- *Bir örnek?*

- 20. yüzyıl boyunca İskandinav ülkelerinde doğum oranı düşmüş. 20. yüzyıl boyunca İskandinav ülkelerinde leylek nüfusu da düşmüş. Her korelasyon nedensellik ilişkisi anlamına gelseydi, bunu bebekleri leyleklerin getirdiği önermesine destek veren bir veri olarak yorumlamak gerekirdi…

- *Aslında, kurbağanın sindirim sistemi yine de çevremizde olan bir şey. Belki de yakınımızdaki bir yerdeki kurbağalarda olacak bir değişim, kurbağaların sindirim sistemleri aracılığıyla bir çevre sorununa işaret edebilir. Peki, dünyadan binlerce, yüz binlerce ışıkyılı uzaklıktaki, bizi hiç etkileyemeyecek bir yıldızın özelliklerini incelemek için yıllarını veren astronomu, CERN'de Higgs parçacığını bulmak için harcanan milyarlarca parayı nasıl yorumlayacağız? "Bana ne o yıldızdan, bana ne Higgs*

parçacığından?” demez mi sokaktaki adam? Hani ne diyor şair, “Gökte yıldız ararken nice turfa müneccim / Gaflet ile görmez kuyuyu rehgüzerinde”.

- “Doğa ile ilgili faydasız bilgi diye birşey yoktur” ifadesini tekrarlayacağım; yeni yeni örnekler vermenin çok anlamı yok.[139] Ayrıca **World Wide Web** denen standartın CERN’de çalışan bir fizikçi tarafindan icat edildiğini biliyor muydun? Amacı, fizikçilerin bilimsel bilgi ve verileri daha kolay paylaşabilmesiydi. Şu anda da (2010) bilgisayar yazılımı ve donanımı konusunda en üst düzey gelişmeler CERN’de meydana geliyor.[140] Bunlar, en temel parçacık fiziğini ilerletmeye çalışan bilimcilerin çabalarının yan ürünleri! İnsanlar yeterince yetenekli ve motive olunca, yan ürünler bile böyle oluyor…

139)Yine de, Hawking ışınımının baryon sayısı korunumunu aşabilmesi sayesinde, çok uzak gelecekte kara deliklerin kütleyi enerjiye çekirdek kaynaşmasından (füzyondan) çok daha yüksek oranlarda dönüştürmek için kullanılabileceği yolunda spekülasyonlar yapıldığını belirtelim.

140)Çünkü, LHC’den beklenen veri akımı o kadar yüksek ki -saniyede gigabayt mertebesinde- bunun bırakın analizini, geldiği hızla kaydedilmesi bile günümüz teknolojisiyle zor. Verilerin bu hızda yıllarca biriktiğini düşünün.

- *Bu yetenekli insanlar doğrudan bilgisayar teknolojisinde çalışsalar daha verimli olmazlar mı?*

- Merak olmadan aynı motivasyonu sağlayamazsın. Yalnızca yüksek maaş vererek olmuyor; hani nasıl derler, “insanın içinde olacak”…

- *Aslında haklısınız, futbolda bile bu böyle bazen...*

- Konuya bir de kolektif açıdan yaklaşalım: İnsanlığın bilgi birikiminin tamamını düşünelim. İlke olarak bu herkese açıktır. Yani herkes diyebilir ki, “Vaktim olsa, yeterince çaba göstersem, bir de anlatan olsa, ben de Güneş’in nasıl ışık verdiğini ya da bir pilin nasıl çalıştığını ya da deterjanların nasıl üretildiğini ya da kara delikleri anlayabilirim.” Yani biz bilimciler, bir anlamda insanlığın dünyayı/evreni anlamadaki vekilleri oluyoruz.

Bunu ilkçağ öncesi yaşam ile, hatta ortaçağ Avrupa’sının ormanlar içinde hapsolmuş, en fazla birkaç yılda bir, bir keşişin uğradığı bir köyündeki yaşam ile karşılaştır: Hayat bilinmezliklerle dolu, ormanın içinde, ya da görünür ufkun ötesinde ne olduğunu bilmiyorsun…

Orman perilerinden, ejderhalardan korkuyorsun. Ya da çöldeki cinlerden. Gemiciysen, fazla uzaklaşırsan dünyanın kenarından aşağı düşmekten. Güneşin bile yarın doğacağından yüzde yüz emin değilsin; Eski Yunanlılar'ın, görevi güneşi gökte taşımak olan bir tanrısı vardı, ya adam yarın görevini savsaklarsa? Belki Olimpos'ta içip sarhoş olmuştur bu akşam?

Bilimdeki her ilerleme, bilinmeyenin sınırlarını, dolayısıyla korkunun sınırlarını geri itiyor; dünyayı/evreni yüzlerce kaprisli Tanrının/cinin/perinin/ruhun her an her şeyi yapabilecekleri, **bilinemez** bir yer olmaktan biraz daha uzaklaştırıp, **bilinebilirliğini** biraz daha pekiştiriyor. Bu geriye itilen korku sınırları, bu bilinebilirlik duygusu, insan olarak kendimizi daha iyi hissetmemizi, daha mutlu olmamızı sağlıyor. Bilimin böyle bir işlevi de var…

- *Evet, evet... Ortaçağlarda geçen bazı filmleri izlerken, onların yerinde olmayı hiç istemeyeceğimi düşünmüştüm ama, kendime bu şekilde ifade etmemiştim... Korku kötü şey ve giderilmesi de önemli bir işlev...*

- Bu arada, bilgimizin sınırları genişledikçe, bu sınırlar doğal olarak merkezden uzak olmaya başlıyorlar. Bazı bilimcilerin uğraş konularının günlük hayatımızdan kopuk gibi gözükmesinin sebebi bu. Bilimin gelişimi bir keşif faaliyeti -ve ilk keşif yolculukları daha yakın yerlere yapılır. Her kâşif, kendinden öncekilerden biraz daha uzaklara gider ve bir zaman sonra kâşiflerin geri getirdikleri günlük hayat betimlemeleri, bize çok aykırı gelmeye başlayabilir: Alt dudaklarını adeta birer tabak haline getirerek daha çekici olduklarını düşünen Afrikalı genç kızların fotoğraflarını belki görmüşsünüzdür; evlerini buzdan inşa edenler, bizim hiçbir zaman yemeyeceğimiz şeyleri yiyenler, çokkocalılık uygulayanlar vb. de yok mu? Deneyimlerimizden uzaklaşınca bu deneyimlere aykırı gibi görünen şeyler bulmamızdan daha doğal ne olabilir?

Tabii, fizikte "uzaklaşma" mesafe şeklinde değil de, çok daha küçük, ya da çok daha hızlı, ya da çok daha büyük vb. objeleri incelemek şeklinde oluyor. Ve nasıl bizim Eskimolarla da, Pigmelerle de paylaştığımız, bizi insan yapan ortak özellikler varsa, günlük deneyimlerimizden farklı gibi görünen kuramların da birleştirici ilişkileri vardır. 4. Soruda farklı kuramlar arasındaki ilişkilerden biraz bahsetmiştik…

Şekil 64'ün hissettirdikleri üzerine konuşarak bitireyim… Eline irice bir topluiğne başı al. Kolunu mümkün olduğu kadar uzatarak topluiğne başını havada tut. Şimdi bunun gökyüzünde kapattığı alanı düşün. İşte bu kadar bir alana astronomlar Hubble teleskopunu odakladılar ve pozlaması yüzlerce saate eşdeğer bir fotoğraf çektiler, sonucu Şekil 64'te görüyorsun. Fotoğrafta binlerce gökada görünüyor!

- *Bizim dünyamız bu evrende bir toz zerresi bile değil...*

- Evet, bu fotoğrafın bana verdiği iki duygudan biri bu… Şu koskoca evrenin karşısında ne kadar küçük, ne kadar önemsiz olduğumuz... Ama bir taraftan, biraz da olsa gururlanıyorum insanlık adına: O küçücük toz zerresinin üzerinde yaşayan bizler, bu küçüklüğümüze, önemsizliğimize karşın, temel bir seviyede de olsa, **bu koskoca evreni anlayabiliyoruz**… Bence bu da çok güzel bir duygu…

F

m_1

m_1

F_1

F_2

m_2

m_2

F